

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS LECHEROS DEL  
URUGUAY**

**por**

**Eduardo Enrique LLANOS GARCÍA**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
*Magister* en Ciencias Agrarias  
opción Ciencias Animales

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
Octubre 2011

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dra. Ana Espasandín, el Dr. Rubén Jacques, el Dr. Francisco Dieguez y el Dr. Rafael Terra el 26 de Octubre 2011.  
Autor: Eduardo Enrique Llanos García. Director: Valentín Picasso, Co-directora: Laura Astigarraga.

## AGRADECIMIENTOS

A la fundación Gran Mariscal de Ayacucho, por el apoyo financiero otorgado. A la Universidad de la República Oriental de Uruguay y en particular al Departamento de Producción Animal y Pasturas por darme el espacio para crecer intelectualmente. A los Ingenieros Agrónomos Valentín Picasso y Laura Astigarraga, por haber dirigido este trabajo, y porque más que dirigir una investigación orientaron a un ser humano.

A Ricardo Cavassa, Andrés Ferrari, Rafael Vidal, por suministrar información esencial para esta investigación. A Danny Camargo, Andrés Beretta, Pablo Modernel, Carolina Lizarralde, Cristina Cabrera por su incondicional apoyo, sus ánimos y sus grandes favores: documentos, artículos, ideas, opiniones.

Al jurado compuesto por: Ana Espasandín, Rubén Jacques, Francisco Dieguez y Rafael Terra. Por el interés en este trabajo y el gran aporte en sus opiniones y críticas.

A los compañeros del Departamento de Producción Animal y Pasturas y en especial a Yoana Dini, Laura Caorsi y Raquel Pérez por haber compartido el espacio-tiempo y su apoyo moral.

A los camaradas y compatriotas que he compartido en tierras lejanas y por sobre todo ser mis amigos y aceptarme como parte de su familia.

Pero sobre todo agradezco a mi familia y mi pareja sentimental, sin ellos este nuevo logro no hubiera sido posible.

Seguramente se me olvida una gran cantidad de personas, a todas ellas, de antemano, una franca disculpa.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 FUNDAMENTACIÓN DEL ESTUDIO DE LA ENERGÍA         EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 DEFINICIONES.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1 <u>Energía</u>.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 <u>Energía Renovable vs Energía Fósil</u>.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.3 <u>Eficiencia Energética y Balance Energético</u>.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA MEDICIÓN DE         ENERGÍA A NIVEL PREDIAL.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.1 <u>El Método PLANETE</u>.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2 <u>Agro-Eco-Index</u>.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.3 <u>Sistema Computarizado ENERGÍA 3.01</u>.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.4 <u>Diferentes trabajos con metodologías para el                 cálculo de la energía</u>.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 CONTEXTO DE PRODUCCIÓN DE LECHE.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....</b>	<b>11</b>
<b>2. <u>EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS LECHEROS DEL URUGUAY</u>.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 RESUMEN.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 MATERIALES Y MÉTODO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1 <u>Estructura del modelo</u>.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2 <u>Coeficientes y tablas energéticas</u>.....</b>	<b>17</b>

2.3.2.1 Energía en entradas.....	17
2.3.2.2 Energía en alimento comprado.....	19
2.3.2.3 Energía en operaciones de maquinaria.....	20
2.3.2.4 Energía en productos.....	21
2.3.3 <u>Ecuaciones y cálculos</u> .....	22
2.3.4 <u>Base de datos</u> .....	23
2.3.5 <u>Análisis estadístico</u> .....	24
2.4 RESULTADOS.....	25
2.5 DISCUSIÓN.....	31
2.6 BIBLIOGRAFÍA.....	35
3. <u>IMPLICANCIAS Y RECOMENDACIONES</u> .....	38
4. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	42
5. <u>ANEXOS</u> .....	48

## RESUMEN

Reducir el consumo de energía fósil y aumentar la eficiencia energética de los predios agropecuarios puede presentar ventajas ambientales y económicas. El objetivo de este trabajo fue analizar sistemas de producción de leche desde el punto de vista energético, para identificar las principales variables que inciden en la eficiencia energética y consumo de energía fósil, a través de un modelo de entradas y salidas de energía. El modelo incluye como entradas los costos energéticos de los alimentos, mano de obra, electricidad, agroquímicos, combustibles y maquinaria, y como salidas leche y carne. Se analizó una base de datos de 30 predios lecheros del sur de Uruguay remitentes a la cooperativa CONAPROLE, por estratos en base a su eficiencia energética, siendo 0,69; 0,94 y 1,53 los promedios para los estratos bajo, medio y alto respectivamente ( $P < 0,0001$ ). El uso de energía fósil para producir un litro de leche fue de 4,58; 3,22 y 2,04 MJ/l en los estratos bajo, medio y alto respectivamente ( $P < 0,0001$ ). La energía fósil de los agroquímicos y los combustibles representan alrededor del 80% de la energía consumida para los tres estratos. A mayor porcentaje de alimento comprado en la dieta, menor es la eficiencia energética ( $P < 0,0001$ ). Los resultados obtenidos para los predios analizados muestran la existencia de una relación inversa entre la intensificación productiva y la eficiencia energética.

**Palabras clave:** energía fósil, balance energético, intensificación, sistemas productivos.

## SUMMARY

### ENERGY EFFICIENCY SYSTEMS DAIRY OF URUGUAY

Reducing fossil fuel consumption and increase energy efficiency of agricultural land may have environmental and economic benefits. The aim of this study was to analyze milk production systems from an energy standpoint, to identify key variables that affect energy efficiency and fossil energy consumption, through a model of energy inputs and outputs. The model includes as inputs to the system the energy costs of food, labor, electricity, chemicals, fuels and machinery, and as outputs of the system milk and meat. We analyzed a database of 30 dairy farms in southern Uruguay senders to the cooperative CONAPROLE, by strata based on their energy efficiency, being 0.69, 0.94 and 1.53 for strata averages low, medium and high respectively ( $P < 0.0001$ ). The use of fossil energy to produce one liter of milk was 4.58, 3.22 and 2.04 MJ/l in the strata low, medium and high respectively ( $P < 0.0001$ ). Fossil energy of agrochemicals and fuel account for about 80% of the energy consumed for the three strata. A higher percentage of food bought in the diet, energy efficiency is lower ( $P < 0.0001$ ). The results obtained for the properties analyzed show the existence of an inverse relationship between the intensification of production and energy efficiency.

**Keywords:** fossil energy, energy balance, enhancement, production systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. FUNDAMENTACIÓN DEL ESTUDIO DE LA ENERGÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado la preocupación por las consecuencias negativas que la producción agroindustrial ejerce sobre el medio ambiente y por los problemas de la contaminación del aire, del agua y de los alimentos. El crecimiento industrial de nuestros tiempos se basa en el consumo de combustibles fósiles, causantes de un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero que originan el Cambio Climático (IPCC, 2007). Con la Revolución Verde, los sistemas de producción agropecuarios se hicieron más dependientes de insumos externos como fertilizantes, agroquímicos y combustibles, que consumen energía fósil para su producción (Fluck, 1992). El uso de insumos externos y energía fósil ha producido algunos efectos positivos, como el aumento de los rendimientos de los cultivos y una menor variabilidad en las cosechas. Sin embargo, el uso de grandes cantidades de energía fósil de bajo costo económico ha producido indirectamente impactos negativos sobre el medio ambiente (Refsgaard *et al.*, 1998).

El debate sobre el agotamiento de las reservas de petróleo y su impacto en el precio de los combustibles fósiles tiene varias décadas (Pimentel *et al.* 1973, Bonny 1993), y actualmente resurge en el marco del impulso de los biocombustibles. Según la Comisión Brundtland, el consumo total de energía mundial debería ser reducido al 50% antes de 2035 (Refsgaard *et al.*, 1998). Minimizar el consumo de energía fósil es un objetivo para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> y su consecuente cambio climático global (IPCC 1996, Olivier *et al.* 1998, Refsgaard *et al.* 1998). En este contexto el análisis de la energía en los sistemas agropecuarios busca evaluar el impacto del cambio en los patrones de los flujos de energía sobre la estabilidad de los equilibrios ambientales (Giampietro *et al.*, 1994.)

La eficiencia energética es el cociente de las salidas sobre las entradas de energía de un sistema (Odum y Odum, 1981). Aumentar la eficiencia energética y diversificar la matriz energética con fuentes no fósiles son objetivos de las políticas energéticas a nivel mundial, incluido Uruguay (MIEM, 2011). Si bien a nivel mundial el consumo de energía en el sector agropecuario es escaso en relación al consumo energético total (Montico *et al.*, 2007), mejorar la eficiencia energética sería útil para reducir costos de producción y mejorar precios de venta de los productos a través de la certificación ambiental de los productos agropecuarios de exportación hacia países desarrollados.

Los gobiernos de muchos países son cada vez más conscientes de la necesidad urgente de hacer un mejor uso de los recursos energéticos del mundo (IEA, 2008). El Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), ha dejado establecido que la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero se ha incrementado como resultado de la actividad humana desde 1750 y ahora excede largamente los valores pre-industriales. El consumo total de energía a nivel mundial en el sector agropecuario representa el 3%, liderando los sectores de transporte e industria (IEA, 2008). A pesar de ser un valor relativamente pequeño, desarrollar sistemas agrícolas energéticamente eficientes contribuiría positivamente a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (Denoia *et al.*, 2008).

Para el caso de Uruguay si se analiza el abastecimiento de energía por fuente, se observa la gran dependencia del país de las fuentes de energía importadas destacándose la importancia de los hidrocarburos: petróleo y derivados 58,4% y gas natural 1,4% (MIEM, 2011), La electricidad importada participó en el 2009 solamente con un 3,1% destacándose el crecimiento relativo de la biomasa en el abastecimiento, pasando de un 16 – 19% en los años 2006 y 2007 a un 26,1% en el 2009.

El sector agropecuario y pesca representa el 7 % del consumo total de energía del país (MIEM, 2011), con un predominio absoluto del gas oíl (71% en el 2009). El consumo de electricidad en el sector agropecuario y pesca ha venido creciendo, alcanzando en el 2009 una participación del 10%. Hay que destacar que estos datos incluyen solamente el consumo de diesel, nafta y electricidad, sin contar el valor energético de los agroquímicos que son también una fuente de energía fósil que pueden representar la principal fuente directa del consumo de energía en los sistemas productivos (Pimentel *et al.* 1973, Bel *et al.* 1978).

## **1.2. DEFINICIONES**

### **1.2.1 Energía**

Energía se define como la capacidad de realizar trabajo, es decir cuando una fuerza mueve un cuerpo a una distancia dada. La unidad del Sistema Internacional de Medidas para la energía es el Julio (Joule, J), que corresponde al trabajo que realiza una fuerza de 1 Newton por una distancia de 1 metro (Bureau International des Poids et Mesures, 2006). Otra unidad de la energía es la kilocaloría (kcal), que es la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado centígrado la temperatura de un kg de agua. En este trabajo se expresará la energía en Mega Joules (MJ), es decir 1 kcal, que equivale a 0,04186 MJ.

Para entender cómo fluye la energía por el ecosistema es importante tener en cuenta las dos leyes de la termodinámica. La primera ley indica que la energía no se pierde ni se gana sino que se transforma, es decir que en un sistema cerrado la energía es constante. Los ecosistemas son sistemas abiertos, con entradas y salidas, la energía y los materiales cruzan sus límites. De la primera ley sigue que toda la energía que entra en un ecosistema se acumula o sale de él. El primer principio indica a su vez que la forma en que la energía entra al ecosistema no es la misma que la forma en que se almacena o sale (Paruelo y Batista, 1999). El flujo total de entrada, expresado por ejemplo en MJ/año deberá igualar a la suma de las salidas y la

acumulación. Sin embargo, el tipo de energía que entra, sale o se almacena será distinto. La principal fuente de energía es el sol. La energía que provee esa fuente es radiación electromagnética de longitud de onda corta (menor a 3000 nm). La principal pérdida de energía es en la forma de calor. La forma más común de acumulación de energía en el ecosistema es en enlaces carbono-carbono en tejidos vivos, biomasa muerta o fósil. Esta es una forma de energía que se libera como calor al transformarse la sustancia, por ejemplo en la respiración o en la combustión.

### **1.2.2. Energía renovable vs energía fósil**

La mayor parte de la energía utilizada por los seres vivos procede del Sol, las plantas la absorben directamente y realizan la fotosíntesis, los herbívoros absorben indirectamente una pequeña cantidad de esta energía comiendo las plantas.

La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol. La energía hidroeléctrica usa la energía potencial del agua que se condensó en la altura después de haberse evaporado por el calor del sol, los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar y los combustibles fósiles preservan energía solar capturada hace millones de años mediante fotosíntesis.

La energía renovable es aquella que se repone con rapidez mayor a la tasa de uso, como para ser considerado inagotable, porque se deriva de fuentes naturales inagotables como el agua, el sol y el viento (EIA, 2011). El uso de la energía renovable puede ser un medio para limitar el consumo de combustibles fósiles y por lo tanto ofrecer un mejor cierre de los ciclos biogeoquímicos (Bochu, 2002).

Se define energía fósil como aquella proveniente de fuentes que tienen un período de formación de muy largo plazo como el petróleo, carbón y gas (EIA, 2011). El cálculo del consumo de energía fósil en agro ecosistemas (Pimentel y Patzeck 2005, Viglizzo *et al.* 2006) se basa en sumar el costo energético de distintos insumos

(plaguicidas, fertilizantes, alimentos balanceados, combustibles, etc.) y distintas actividades agropecuarias (arada, rastreada, siembra, fumigación, etc.).

### **1.2.3. Eficiencia energética y balance energético**

La eficiencia energética es el cociente entre la energía producida y la energía consumida (Odum y Odum, 1981). Para realizar estimaciones a nivel predial se suma por un lado la energía de todas las fuentes de consumo y por otro la energía de todos los productos. Cuanta más energía se utiliza para producir un producto, más ineficiente es el proceso productivo del predio.

La energía solar captada en Uruguay es en promedio anual  $4,4 \text{ kWh/m}^2$  (Abal *et al.*, 2010), esto representa 14400 MJ/ha, esta es la mayor fuente de energía, y la base del proceso productivo. El productor para poder cosechar la energía solar utiliza otras entradas de energía al predio, que incluyen combustibles, fertilizantes, electricidad, etc. La energía solar no es contabilizada en nuestros cálculos, porque es en varios órdenes de magnitud superior a las otras fuentes.

El consumo de energía y la eficiencia con que esta es utilizada, son medidas que indican el potencial de riesgo ecológico (contaminación, emisión de gases de efecto invernadero, intervención de hábitats, etc.) que impone un proceso productivo. A su vez, un aumento progresivo del consumo de energía fósil será indicativo de un creciente grado de intensificación productiva en términos de uso de insumos (McRae *et al.*, 2000).

El balance energético es la diferencia entre la energía producida y la energía consumida (sin contar la energía solar directa). Un balance energético de 0, corresponde a un sistema productivo que logró cosechar en productos agropecuarios de la energía solar apenas lo mismo que entró de energía adicional al sistema. Valores positivos de balance energético corresponden a sistemas que consumen menos energía que la que producen, esta última situación es la deseable en los

sistemas productivos, si bien debe tenerse en cuenta que si se contabilizara la energía solar, todos los balances serían negativos y la eficiencia energética ínfimamente baja.

### **1.3 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE ENERGÍA EN PREDIOS**

Para el cálculo de la eficiencia energética de un sistema corresponde identificar las entradas y salidas energéticas del sistema de producción, considerado este un sistema abierto. Los diferentes métodos de medición varían en cuanto a las variables que incluyen en el análisis.

#### **1.3.1 El Método PLANETE**

Es un programa de computación elaborado por Solagro (Asociación sin Fines de Lucro) y otros organismos, que analiza la energía específica de los sistemas de producción agropecuarios (Bochu, 2001). Permite cuantificar las entradas y las salidas de energía no renovable, clasificando las entradas en dos tipos: las directas (combustibles, gas y la electricidad); y las energías indirectas que corresponden a las energías utilizadas para la producción dentro de la explotación (abonos, fertilizantes, productos fitosanitarios, alimento, semillas, estructuras y materiales de construcción). Estas entradas representan el consumo de energía en MJ y la eficiencia energética de cada explotación, creando una base de datos de varias explotaciones agrícolas francesas.

PLANETE se basa en el análisis del ciclo de vida, definido por la norma ISO 14041, ya que contabiliza las entradas de los productos desde su inicio hasta su destrucción y analiza los impactos medioambientales en la elaboración y el uso de esas entradas sobre el agua, suelo, aire y recursos no renovables (Bochu, 2001). Solamente considera la energía no renovable o fósil del sistema.

### **1.3.2 Agro-Eco-Index**

Es un soporte informático, basado en hojas de cálculo de Microsoft Excel, que contiene indicadores de gestión ambiental especialmente diseñados para empresas agropecuarias. Profesionales del INTA (Argentina) y de otras instituciones y empresas, están utilizando esta metodología para evaluar el desempeño ambiental de establecimientos rurales de producción en la región pampeana y otras regiones. Permite la estimación de una serie de indicadores agroecológicos cuantitativos, diseñados para facilitar el diagnóstico y la interpretación de procesos críticos en los agroecosistemas (Viglizzo, 2006). Son varios los indicadores presentes en esta metodología, entre ellos, se encuentra el consumo de energía fósil, la eficiencia en el uso de la energía fósil, balance de nitrógeno y fosforo, riesgo de contaminación por nitrógeno y fosforo, contaminación por plaguicidas, eficiencia en el uso de agua, impacto sobre el hábitat, entre otros. Los indicadores obtenidos por medio del Agro-Eco-Index se clasifican en positivos, intermedios e inconvenientes. Estos resultados se visualizan mediante una representación gráfica que se denomina “panel de control”, en donde los positivos tienen color verde, los intermedios amarillos y los inconvenientes rojos (Viglizzo *et al*, 2002). El Agro-Eco-Index es un procedimiento que en mayor o menor medida tiene cierta cuota de “subjetividad” ya que se evalúan parámetros y atributos ambientales que en general no son cuantificables y que es necesario expresarlos en valor numérico mediante indicadores que permiten clasificarlos (Iglesias, 2004). Otra limitante del agroecoindex es que compara los indicadores con los promedios de la base de datos con la que opera, por lo que es auto referenciado y limitado a la amplitud de la misma (Frank, 2009). El modelo agroecoindex se encuentra en: <http://www.inta.gov.ar/anguil/info/agroecoindex.htm>

### **1.3.3. Sistema Computarizado ENERGÍA 3.01**

Es una metodología que facilita las operaciones de cálculo energético y ofrece un resultado rápido que refleja cual es la eficiencia en el uso de la energía de un sistema productivo así como la cantidad de personas que puede alimentar tomando en cuenta

las producciones obtenidas y los insumos utilizados (Funes, 2009). Este modelo desarrollado en Cuba permite la evaluación de la eficiencia energética y las diferentes variantes de análisis e indicadores, obteniendo valores energéticos de los productos elaborados como salidas del sistema y tomando en cuenta todas las entradas energéticas del sistema. Recoge en planillas los elementos necesarios para calcular la eficiencia energética como: área del sistema productivo (parcela, finca, cooperativa, municipio, provincia, país); tipo y cantidad de los alimentos o productos obtenidos; y gastos energéticos directos o indirectos de la producción, entre ellos la fuerza de trabajo humana y animal, combustibles, fertilizantes, entre otros. El sistema computarizado Energía 3.01 permite realizar el cálculo de 15 parámetros relacionados con la eficiencia energética del sistema productivo. A diferencia de los otros sistemas toma el valor de la mano de obra entre sus entradas, y se caracteriza por dar resultados del número de personas que se pueden alimentar en base a la proteína animal y vegetal, con las producciones agropecuarias de acuerdo a los requerimientos anuales de energía, expresados en personas por una hectárea de terreno.

#### **1.3.4. Diferentes trabajos con metodologías para el cálculo de la energía.**

En bibliografía internacional existen otros trabajos que utilizan metodologías para medir la energía en sistemas prediales, este es el caso de Refsgaard *et al.* (1998) que utiliza el análisis de procesos propuesto por Fluck (1992), que evalúa las entradas de energía como directa e indirecta de todos los insumos de energía. La energía directa se refiere al combustible que se quema en el lugar de producción, y la indirecta se refiere a combustible quemado en otros sectores para la fabricación de los materiales adquiridos y utilizados como insumos en el sitio de producción (por ejemplo, energía para la producción de fertilizantes minerales), cuanto más energía indirecta entra al predio, menor será el contribución al coste de la energía total del producto agrícola. Otro trabajo publicado que utiliza una metodología para la medición de la energía en predios, es el presentado por Guido *et al.* (2001) que usa el método LCA (Life Cycle Assessments) adaptado para la agricultura, de acuerdo con indicadores específicos

agroambientales, impacto en la imagen de la biodiversidad del paisaje y bienestar de los animales. La cantidad de energía fósil es calculada en base al consumo de factores de energía primaria de Alemania.

La metodología utilizada por Cederberg y Mattsson (1998) están relacionados con predios de producción de leche con la excepción del consumo de electricidad que divide entre producción de leche y otras actividades en las fincas por medio de estimaciones. Los datos para la alimentación y la extracción de petróleo, se calculan en base a datos de industrias en Suecia y Noruega. Los datos de extracción de petróleo para las industrias fuera de los países nórdicos se basan en el uso de energía con mejor técnica disponible. Sobre las emisiones y el uso de los recursos en producción de fertilizantes, proviene de un inventario exhaustivo de los fertilizantes más utilizados en Suecia y Europa occidental. Los datos sobre producción de cultivos fuera de Suecia para la producción de alimentos concentrados se basan en estimaciones de los expertos en agricultura y estadísticas.

Los trabajos considerados, realizados por diferentes autores, en el que miden el consumo de energía, utilizan diferentes metodologías, coeficientes energéticos y objetivos para cuantificar las entradas y las salidas de energía (Tabla 1).

*Tabla 1. Comparación de trabajos de la bibliografía en base a las variables utilizadas en los modelos de estimación de consumo y eficiencia energética.*

	Método Planet	Agro-Eco-Index	Energy 3.01	Refsgaard et al., (1998)	Guido et al., (2001)	Cederberg y Mattsson, (1998)
Agroquímicos	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Maquinaria	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Combustibles	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Infraestructura	Sí	No	No	Sí	No	No
Transporte	Sí	No	No	Sí	No	No
Electricidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Energía renovable	No	No	No	No	No	No
Mano de obra	No	No	Sí	No	Sí	No
Leche	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Carne	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí
Agricultura	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

## **1.4 CONTEXTO DE PRODUCCIÓN DE LECHE**

Durante el 2009 el volumen de producción lácteo a nivel mundial fue de 430 mil millones de toneladas métricas, con un crecimiento en un 1,5% de aumento (MGAP-DIEA, 2010). Sudamérica aporta aproximadamente el 10% de la producción mundial, donde particularmente Brasil se destaca en su dinámica (5% de aumento esperado para 2010), y Argentina continuaría creciendo un 2%. Para el caso de Uruguay durante el año 2009 se estimó la producción total de leche en 1.770 millones de litros (MGAP-DIEA, 2010). El 96 % de la misma proviene de predios con actividad comercial en lechería y el resto se obtiene de otros predios agropecuarios con fines exclusivamente de autoconsumo. La performance productiva por animal muestra mejoras en todos los indicadores, con un máximo de 16,9 litros por vaca en ordeño, como también por vaca masa (vacas en ordeño + vacas secas) de 4,3 mil por vaca masa/año, (MGAP-DIEA, 2010).

Si bien en Uruguay la base del sistema de producción lechero es mayormente pastoril (las pasturas componen más del 70 % de la dieta), existe un incremento en los niveles de alimento concentrado y forrajes conservados (Astigarraga, 2004) que se asocian a niveles productivos mayores. En este sentido los sistemas lecheros en Uruguay presentan interés para el estudio del impacto del grado de intensificación en la eficiencia energética y el consumo de energía fósil, debido a que presentan niveles de intensificación diversos, y hay interés del sector lácteo en indicadores de calidad ambiental de la producción.

La intensificación de los sistemas productivos esta asociado a el uso de concentrados y reservas, teniendo el efecto simultáneo de aumentar la productividad de leche en l/ha y a la vez el consumo de energía fósil del sistema, por lo que su efecto neto en la eficiencia energética se desconoce. Si el aumento en productividad de leche genera un aumento de energía en productos superior al aumento del consumo de energía, la intensificación aumentaría la eficiencia energética. Sin

embargo, podría darse el caso que el aumento en consumo de energía fósil sea mayor que el aumento de producción de leche, reduciéndose la eficiencia energética.

## **1.5 OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

El objetivo de este estudio es analizar distintos sistemas de producción de leche desde el punto de vista energético, para identificar las principales variables que inciden en la eficiencia energética y consumo de energía fósil. Como objetivos específicos se plantearon: desarrollar un modelo para cuantificar las entradas y las salidas de energía dentro de un sistema de producción lechero ajustado a las condiciones de Uruguay; determinar la eficiencia energética y consumo de energía fósil para un conjunto de predios lecheros del sur del Uruguay; identificar las variables tecnológicas más asociadas a la eficiencia energética y consumo de energía fósil con énfasis en la intensificación productiva.

La hipótesis de inicio es que a mayor intensificación (medida en términos de productividad de leche por hectárea) de los sistemas de producción, mejora la eficiencia energética.

Los resultados y los análisis obtenidos en este estudio serán enviados a publicación en la revista *Agrociencia Uruguay*, con el fin de brindar información y proporcionar una herramienta para futuras investigaciones, de modo que puedan considerar una variable de gran interés como es la energética. Esta variable puede estar acompañada por otros trabajos de investigación en lo económico y ambiental, contribuyendo a la realización de análisis más completos en las áreas de producción agropecuaria.

## **2. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS LECHEROS DEL URUGUAY**

### **2.1 RESUMEN**

Reducir el consumo de energía fósil y aumentar la eficiencia energética de los predios agropecuarios puede presentar ventajas ambientales y económicas. El objetivo de este trabajo fue analizar sistemas de producción de leche desde el punto de vista energético, para identificar las principales variables que inciden en la eficiencia energética y consumo de energía fósil, a través de un modelo de entradas y salidas de energía. El modelo incluye como entradas los costos energéticos de los alimentos, mano de obra, electricidad, agroquímicos, combustibles y maquinaria, y como salidas leche y carne. Se analizó una base de datos de 30 predios lecheros del sur de Uruguay remitentes a la cooperativa CONAPROLE, por estratos en base a su eficiencia energética, siendo 0,69; 0,94 y 1,53 los promedios para los estratos bajo, medio y alto respectivamente ( $P < 0,0001$ ). El uso de energía fósil para producir un litro de leche fue de 4,58; 3,22 y 2,04 MJ/l en los estratos bajo, medio y alto respectivamente ( $P < 0,0001$ ). La energía fósil de los agroquímicos y los combustibles representan alrededor del 80% de la energía consumida para los tres estratos. A mayor porcentaje de alimento comprado en la dieta, menor es la eficiencia energética ( $P < 0,0001$ ). Los resultados obtenidos para los predios analizados muestran la existencia de una relación inversa entre la intensificación productiva y la eficiencia energética.

**Palabras Clave:** energía fósil, balance energético, intensificación, sistemas productivos.

## **SUMMARY**

### **ENERGY EFFICIENCY SYSTEMS DAIRY OF URUGUAY**

Reducing fossil fuel consumption and increase energy efficiency of agricultural land may have environmental and economic benefits. The aim of this study was to analyze milk production systems from an energy standpoint, to identify key variables that affect energy efficiency and fossil energy consumption, through a model of energy inputs and outputs. The model includes as inputs to the system the energy costs of food, labor, electricity, chemicals, fuels and machinery, and as outputs of the system milk and meat. We analyzed a database of 30 dairy farms in southern Uruguay senders to the cooperative CONAPROLE, by strata based on their energy efficiency, being 0.69, 0.94 and 1.53 for strata averages low, medium and high respectively ( $P < 0.0001$ ). The use of fossil energy to produce one liter of milk was 4.58, 3.22 and 2.04 MJ/l in the strata low, medium and high respectively ( $P < 0.0001$ ). Fossil energy of agrochemicals and fuel account for about 80% of the energy consumed for the three strata. A higher percentage of food bought in the diet, energy efficiency is lower ( $P < 0.0001$ ). The results obtained for the properties analyzed show the existence of an inverse relationship between the intensification of production and energy efficiency.

**Key Words:** fossil energy, energy balance, enhancement, production systems.

## 2.2 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción post Revolución Verde se hicieron más dependientes de insumos externos como fertilizantes, agroquímicos y combustibles, que consumen energía fósil para su producción (Fluck, 1992). Minimizar el consumo de energía fósil es un objetivo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático global (IPCC, 2007). La eficiencia energética es el cociente de las salidas sobre las entradas de energía de un sistema. Aumentar la eficiencia energética y diversificar la matriz energética con fuentes no fósiles son objetivos de las políticas energéticas a nivel mundial, incluido Uruguay (MIEM, 2011). Desarrollar sistemas agrícolas energéticamente eficientes permitiría reducir costos de producción y aumentar los precios a través de la certificación ambiental de los productos agropecuarios de exportación.

En los últimos 20 años la producción lechera en Uruguay ha crecido consistentemente (DIEA, 2009). La base del sistema de producción es pastoril, si bien existe un incremento en los niveles de alimento concentrado y forrajes conservados (Astigarraga, 2004) que se asocian a niveles productivos mayores. Los sistemas lecheros en Uruguay presentan una variación en términos de uso de insumos por unidad de superficie, que los torna interesantes para estudiar el impacto del grado de intensificación en la eficiencia energética y el consumo de energía fósil, apoyados además por el sector lácteo en incluir indicadores de calidad ambiental de la producción en el análisis de la performance productiva de los predios.

La intensificación de los sistemas productivos está asociada al uso de concentrados y reservas, teniendo el efecto simultáneo de aumentar la productividad de leche en l/ha y a la vez el consumo de energía fósil del sistema, por lo que no es claro su efecto neto en la eficiencia energética. La hipótesis es que a mayor intensificación (medida en términos de productividad de leche por hectárea) de los sistemas de producción, mejora la eficiencia energética. El objetivo de este estudio es analizar distintos sistemas de producción de leche desde el punto de vista energético, para

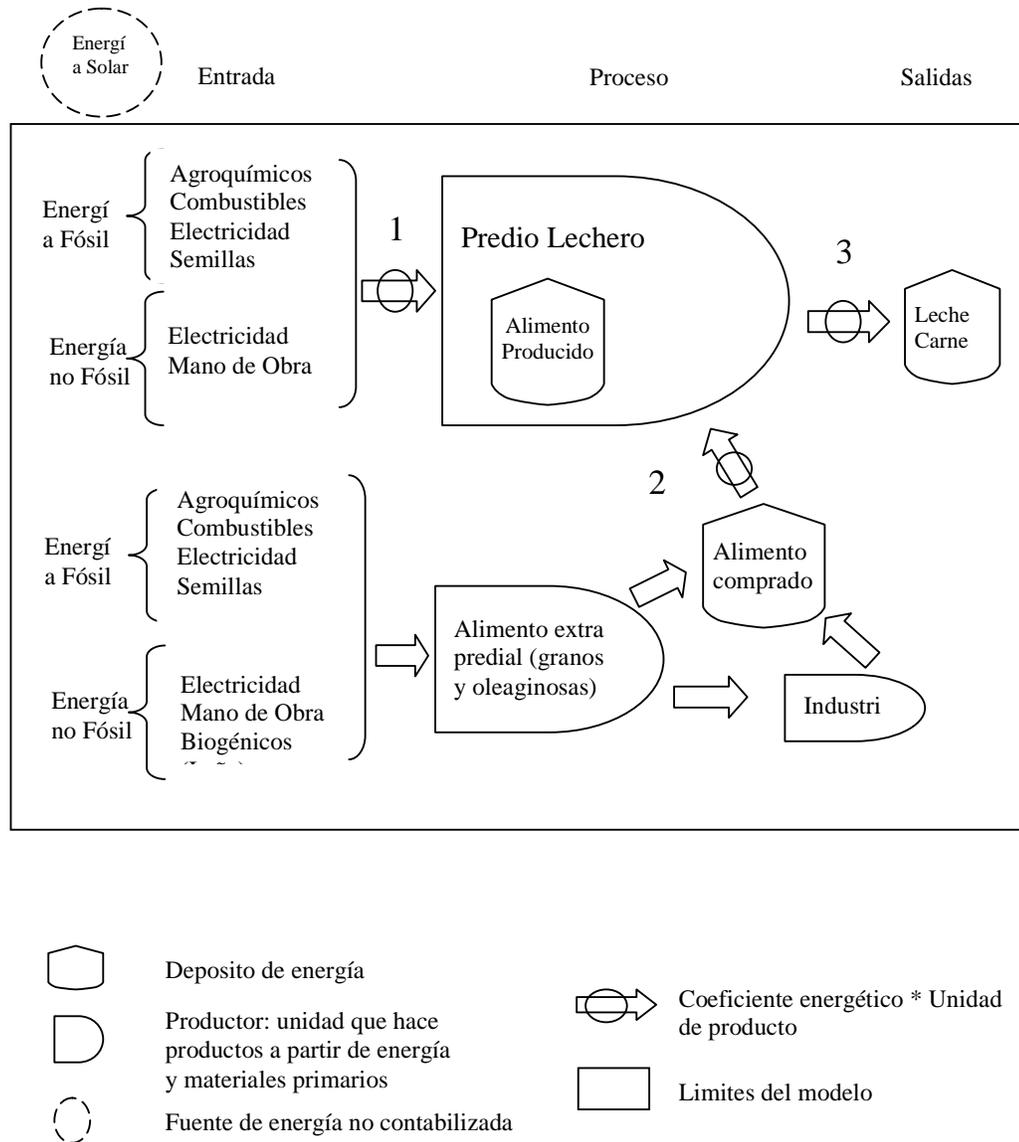
identificar las principales variables que inciden en la eficiencia energética y consumo de energía fósil. Como objetivos específicos se plantearon: 1. desarrollar un modelo para cuantificar las entradas y las salidas de energía dentro de un sistema de producción lechero ajustado a las condiciones de Uruguay; 2. determinar la eficiencia energética y consumo de energía fósil para un conjunto de predios lecheros del sur del Uruguay; 3. identificar las variables tecnológicas más asociadas a la eficiencia energética y consumo de energía fósil con énfasis en la intensificación productiva.

## **2.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.3.1 Estructura del modelo**

La figura 1 muestra el modelo utilizado con los límites del mismo a nivel del predio. El productor puede incidir en tres puntos para mejorar su eficiencia energética: 1) la cantidad de insumos entrantes al sistema, 2) la cantidad de alimento comprado como una fuente externa de energía y 3) la salida de producto como una variable productiva propia del predio.

Figura 1. Límites considerados en el modelo energético para un sistema productivo.



El modelo se realizó en una planilla de cálculo Excel (Microsoft, 2007) con 5 hojas. Las entradas del modelo se ingresan en la primera hoja, siendo datos de clasificación del predio (nombre, propietario, superficie, mano de obra), y datos productivos: litros de leche producida por año, stock de animales y ventas, alimento comprado (maíz, sorgo, afrechillo de trigo, soja, pellet de girasol, sustituto lácteo,

alimentos concentrados), agroquímicos y semillas, y superficie utilizada en las diferentes actividades agrícolas en el predio (pasturas, silo, fardos, silo de grano húmedo, cultivos de granos y mantenimiento). Los cálculos se realizan en la segunda hoja en base a las ecuaciones y coeficientes energéticos. Las salidas numéricas se presentan en la tercer hoja: eficiencia energética, energía consumida y producida (total, por hectárea y por litro de leche), la partición del consumo de energía en maquinaria, mano de obra, alimento comprado, actividades agrícolas y alimento producido dentro del predio y sus componentes (combustible, electricidad, agroquímicos) separando el uso de la energía fósil y la energía no fósil utilizada. La cuarta hoja presenta salidas gráficas. Una quinta hoja auxiliar presenta los cálculos energéticos para la producción de alimentos comprados.

### **2.3.2 Coeficientes y Tablas Energéticas**

#### **2.3.2.1 Energía en entradas**

Los coeficientes energéticos y los criterios de cálculo tomados de bibliografía nacional e internacional se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios y coeficientes energéticos para las entradas de energía.

Fuente	Entrada (unidad)	Energía (MJ/unidad)	Criterio	Fuente
Energía no Fósil	Mano de obra (jornada)	15,4	Consumo de energía en una jornada de trabajo diaria de una persona de entre 18-30 años.	Funes, (2009)
	Electricidad (kW-h)	2,45	Representa un 68% energía proveniente de la hidroeléctrica-eólica, promedio para la década 2000-2009.	MIEM Uruguay, (2011)
	Leña (kg)	11,3	Utilización de leña en el proceso de industrialización en la preparación de alimentos balanceados.	MIEM Uruguay, (2011)
Energía Fósil	Diesel (l)	38,5	Poder calorífico superior del diesel utilizado en Uruguay, analizados por la técnica de bomba calorimétrica.	MIEM Uruguay, (2011)
	Electricidad (kW-h)	1,15	Representa un 32% energía proveniente de fuentes de energía fósil, promedio para la década 2000-2009.	MIEM Uruguay, (2011)
	Herbicidas (kg)	266,6	El costo energético incluye aquellos de la formulación de los principios activos en aceites emulsionables, polvos mojables, o gránulos, y los de embalaje y transporte.	West y Marland, (2002)
	Insecticidas (kg)	284,8		
	Fungicidas (kg)	288,9		
	Urea 46N-0-0 (kg)	54	La metodología es realizada en bloques de edificio por productos. El modelo de IFA simplificado utiliza gas natural como fuente de producción de amoníaco (que corresponde a casi el 80% de la producción de amoníaco en todo el mundo). En los bloques de construcción, la energía se divide en cada componente del producto ya que la mayoría de estos bloques de construcción son también los fertilizantes comerciales.	IFA, (1998)
	Amonio Nitrate 35N-0-0 (kg)	46,6		
	Mono Amonio Fosfato 11N – 52P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -0 (kg)	4,3		
	Triple Superfosfato 0-48P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -0 (kg)	7		
	Semilla Sorgo (Kg)	43,5		
Semilla Trigo (Kg)	6,6	Cálculo detallado de la energía presupuesto para cada cultivo, incluida la energía para la limpieza de semillas y envasado de la semilla. La energía utilizada en la producción de semillas consiste en un 50, 20, y 30% mezcla de fuel-oil, gas natural y electricidad, respectivamente (Börjesson, 1996).	West y Marland, (2002)	
Semilla Maíz (Kg)	53,3			
Semilla Trébol Rojo (Kg)	87			
Semilla Ryegrass (Kg)	27,4			

### 2.3.2.2 Energía en alimento comprado

Para el alimento comprado que entra al sistema, se calculó el costo energético de la producción de granos y oleaginosas, utilizando los coeficientes de la Tabla 2 y el rendimiento y parámetros técnicos de datos nacionales de la Cooperativa COPAGRAN de Soriano para el año agrícola 2009 presentados en la tabla 3. Los cereales usados, tal cual, para la suplementación, entran directamente a los predios sin ningún proceso energético adicional. A los alimentos como expeller o raciones balanceadas se le adiciona un gasto energético en el proceso industrial requerido para su fabricación, para la cual se tomaron datos de producción del Molino San José, para la preparación de 10 ton/h de alimentos balanceados se usan 500 kW-h en la limpieza de granos y 300 kW-h en la molienda de henos y 400 kW-h de leña para el proceso de peletización. La tabla 3 muestra los coeficientes energéticos calculados por el modelo para el alimento comprado.

*Tabla 3. Criterios y coeficientes energéticos para entradas de energía de alimento comprado.*

<b>Entrada (kg)</b>	<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	<b>Fertilizantes (kg/ha)<sup>(1)</sup></b>	<b>Otros agroquímicos (kg/ha)<sup>(2)</sup></b>	<b>Pasadas de maquinaria<sup>(3)</sup></b>	<b>Energía (MJ/kg)</b>
Girasol	1120	150	9	5	7,2
Trigo	2842	250	5	5	5,1
Maíz	4000	250	8	7	4,4
Sorgo	3800	200	13	5	2,0
Cebada	2245	200	5	5	5,6
Avena	2000	100	1	5	3,7
Soja	2128	250	5	8	7,8
Forraje	5000	100	1	5	2,1
Balanceado recría					6,4
Ración de ternero					5,7
Balanceado invernada					5,2

<sup>(1)</sup> Incluye N, P, K. <sup>(2)</sup> Incluye herbicidas, insecticidas y fungicidas. <sup>(3)</sup> Incluye pasadas de sembradora, pulverizadora, cosechadora. Fuente: elaboración propia en base a datos de COPAGRAN 2009 (Rafael Vidal, comunicación personal, 25 de Junio del 2010) y Molino San José (Andrés Ferrari, comunicación personal, 9 de Mayo del 2011).

### **2.3.2.3 Energía en operaciones de maquinaria**

Se utilizó la metodología para cuantificar los costos energéticos de operaciones de maquinaria presentada por Hetz y Barrios (1997) y apoyada por los antecedentes presentados por ASAE (1993) y Fluck (1992), tanto para la producción del alimento comprado como la utilizada en el predio. Esta metodología determina los costos energéticos totales de la operación agrícola mecanizada (MJ/ha), adicionando la energía secuestrada en los materiales de construcción, incluyendo la fabricación, combustible, lubricantes, filtros, reparación, mantenimiento, y la mano de obra necesaria para operar los equipos. Para ello en el modelo solo es necesario ingresar la cantidad de hectáreas realizadas en la producción. La tabla 4 muestra los valores energéticos calculados para diferentes actividades agrícolas en función de coeficientes técnicos proporcionados por la Federación Uruguaya de Grupos CREA (Astigarraga *et al.*, 2003).

*Tabla 4. Valores energéticos calculados para las diferentes actividades agrícolas: uso de energía por el tractor y uso de energía por los implementos (sembradora, pulverizadora, etc), y porcentaje de la energía usada total que corresponde a combustibles y lubricantes.*

<b>Actividad Agrícola</b>	<b>Operaciones de maquinaria</b>	<b>Energía tractor (MJ/ha)</b>	<b>Energía implemento (MJ/ha)</b>	<b>% de energía en combustibles</b>
Pasturas	3 pasadas de tractor, Fumigadora, Sembradora, Fertilizadora	1224	487	72%
Cultivos para silo verano	3 pasadas de tractor, Sembradora, Fumigadora, Fertilizadora, Cosechadora	2392	487	67%
Cultivos para silo invierno	2 pases de tractor, Sembradora, Fertilizadora Cosechadora,	2124	138	75%
Cultivos para fardos verano	3 pases de tractor, Rastrillo, Pastera cuchillas, Enfardadora	1224	59	76%
Cultivos para fardos invierno	3 pases de tractor, Rastrillo, Pastera cuchillas, Enfardadora	1224	59	76%
Cosecha Silo de grano húmedo	Cosechadora	494	0	80%
Cosecha de grano	Cosechadora	494	0	80%
Mantenimiento caminos, distribución forraje	Tractor, Vagón forrajero, pala o trailla	343	34	73%

#### **2.3.2.4 Energía en productos**

La energía producida se calculó sumando la energía en leche y en carne, según la ecuación:

$$EP = \text{leche (l)} * \text{valor energético (MJ/l)} + \text{carne (kg)} * \text{valor energético (MJ/kg)}$$

Donde: leche= producción de leche anual (litros), valor energético (MJ/l)= a partir de la ecuación de Tyrrell y Reid (1965), en función de los porcentajes de grasa y proteína de la leche; carne= producción de carne anual (kg), valor energético (MJ/kg)= a partir de la adición del valor energético contenido en músculos, esqueleto, órganos, depósito graso, piel y tracto digestivo (Gorrachategui, 1997). Con los valores de peso de los animales y la proporción de los diferentes tejidos que lo

conforman, se procedió a dar valor energético a cada componente del animal utilizando las tablas propuestas por Carnovale y Marletta (2000).

### **2.3.3 Ecuaciones y cálculos**

Para el análisis se tomaran los valores de un año de producción. La eficiencia energética se calculó como el cociente entre energía producida sobre energía consumida (Odum y Odum, 1981), por lo que valores de eficiencia energética mayores indican mayor eficiencia. Para el cálculo del balance energético se resta la energía producida menos la energía consumida, donde valores de balance energético mayores a cero corresponden a eficiencia mayor a 1. La energía consumida es la suma de la energía consumida fósil y la no fósil. La energía consumida fósil es la suma de la energía eléctrica proveniente de fuentes termoeléctricas, la energía fósil usada para el alimento producido en el predio, la energía fósil en alimento comprado fuera del predio y la energía fósil fija en maquinaria. La energía fósil usada para el alimento producido en el predio o comprado fuera del mismo es la suma de la energía en los combustibles y agroquímicos utilizados en el predio o los utilizados en la producción del alimento comprado, respectivamente. La energía no fósil es la suma de la energía eléctrica proveniente de fuentes hidroeléctricas, la energía en mano de obra y la energía proveniente de materiales orgánicos (leña utilizada en la producción de raciones).

El alimento comprado fuera del predio incluye la suma energética de la compra de granos (trigo, cebada, maíz, soja, girasol, sorgo, afrechillo de trigo), forrajes conservados (heno y silo), y raciones (balanceado recría, balanceado invernada, ración terneros y sustituto lácteo). La energía utilizada en las actividades agrícolas para el alimento producido en el predio suma las actividades de implantación y manejo de pasturas, cultivos para ensilar verano, cultivos para ensilar invierno, cultivos para enfardar verano, cultivos para enfardar invierno, cultivos de conservados de grano húmedo, granos, mantenimiento de áreas y distribución de alimento.

En este trabajo se analizaran las entradas y las salidas de energía fósil y no fósil en sistemas de producción de leche, sin embargo no contabilizamos como entrada energética la energía solar incidente, porque es en varios órdenes de magnitud superior a las otras fuentes contabilizadas.

#### **2.3.4 Base de datos**

Se utilizaron los registros productivos de 30 predios remitentes a la cooperativa CONAPROLE, para el ejercicio 2009-2010, ubicados en la región sur del Uruguay, en los departamentos de Colonia, San José, Canelones y Maldonado. La cooperativa suministró la base de datos buscando cubrir la diversidad de situaciones productivas, seleccionando 10 predios que se encontraban en el rango de menores a 4000 litros por hectárea, 10 predios entre 4000 y 6000 litros por hectárea y 10 predios mayores a 6000 litros por hectárea, para un total de treinta predios. Los registros incluyen la información productiva de los predios, datos de variables estructurales (superficie, tenencia) y tecnológicas, uso de la tierra (cultivos y pasturas), actividades realizadas (ensilaje, enfiada, siembra de praderas, mantenimiento), stock de animales por categoría productiva, compra de insumos utilizados en la producción (alimentos, agroquímicos, combustibles), maquinaria agrícola, datos de costos y balances económicos, indicadores de eficiencia productiva y económica. La Tabla 5 presenta algunas variables tecnológicas y productivas analizadas para toda la base de datos.

*Tabla 5. Promedios, máximos, mínimos y coeficiente de variación para las variables superficie (ha), productividad de leche por hectárea (l/ha) y por vaca masa (l/VM), dotación en equivalentes vaca lechera (EVL/ha) y vaca masa (VM/ha), consumo de alimento total, pasturas, reservas y concentrado (kg MS/ha) y porcentaje del alimento consumido de pasturas, reservas y concentrado para 30 productores lecheros.*

		Promedio	Máximo	Mínimo	CV (%)
Superficie (ha)		358	1448	46	92
Productividad por hectárea (l/ha)		5640	13209	2978	38
Productividad por vaca (l/VM)		5492	8581	2758	21
Dotación (EVL/ha)		0,97	1,81	0,57	30
Dotación (VM/ha)		0,73	1,38	0,34	34
Alimento consumido (kg MS/ha)	Total	5268	9935	3114	30
	Pasturas	3004	4226	1853	21
	Reservas	1215	3373	288	63
	Concentrado	1096	3931	89	71
Porcentaje del alimento consumido (%)	Pasturas	60	80	26	23
	Reservas	21	38	7	43
	Concentrado	19	40	2	41

### **2.3.5 Análisis estadísticos**

Una vez introducido los datos productivos en el modelo y obtenido los resultados energéticos, se procedió a clasificar a los productores en tres estratos en base a la eficiencia energética, denominados estratos bajo (10 predios con menor eficiencia energética), estrato medio y estrato alto (10 predios con mayor eficiencia energética). Para las variables eficiencia energética, uso de energía fósil, balance energético y productividad por hectárea (l/ha) y uso de concentrado (kg/concentrado/l) se realizaron análisis de varianza y posterior comparación de medias entre estratos ajustadas por Tukey, con un nivel de significancia del 5%. Además se realizaron análisis de correlación simple de Pearson, análisis de regresión simple y de regresión múltiple (Stepwise) para las variables de interés. Se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT (2009).

## 2.4 RESULTADOS

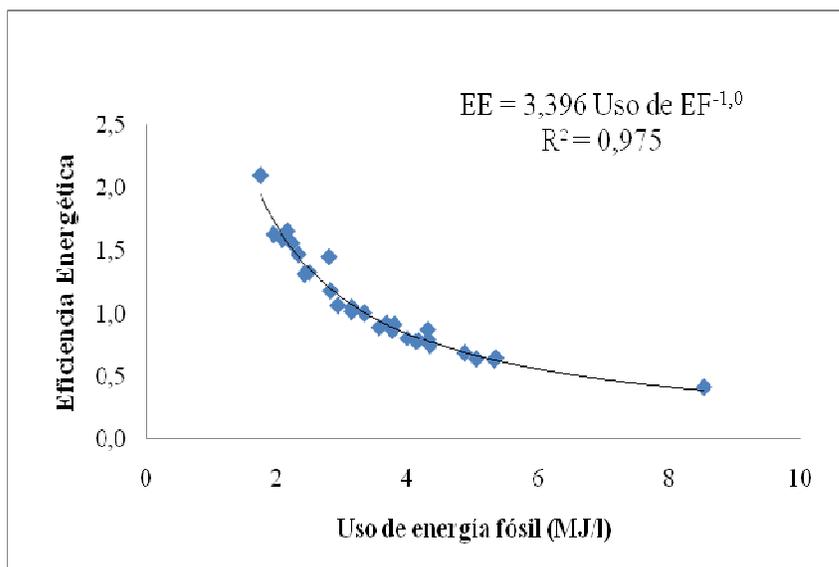
La eficiencia energética fue diferente entre estratos ( $P < 0,0001$ ) siendo el estrato alto el doble que el estrato bajo (Tabla 6). Solamente el estrato alto obtuvo valores de eficiencia energética superiores a 1, y balance energético positivo. El coeficiente de variación entre predios para la eficiencia energética fue de 16 %, y para el consumo de energía fósil fue de 23 %.

*Tabla 6. Eficiencia energética, energía producida y consumida (millones MJ), uso de energía no fósil, uso de energía fósil (MJ/l) total, en alimento producido en el predio, alimento comprado, energía termoeléctrica, maquinaria y balance energético para 30 productores lecheros clasificados en tres estratos por su eficiencia energética: bajo, medio y alto. Valores con letras distintas en la misma fila son diferentes al 5% (Tukey).*

		Eficiencia energética		
		Baja	Media	Alta
Eficiencia energética		0,69 c	0,94 b	1,53 a
Energía producida (MJ/l)		3,45	3,33	3,33
Energía consumida (MJ/l)		5,03 a	3,57 b	2,30 c
Uso de energía no fósil (MJ/l)		0,45	0,34	0,26
Uso de energía fósil (MJ/l)				
	Total	4,58 a	3,22 b	2,04 c
	Alimento producido	2,31 a	1,92 a	1,11 b
	Alimento Comprado	1,84 a	0,95 b	0,67 b
	Energía Eléctrica	0,17	0,13	0,10
	Equipo Maquinaria	0,26 a	0,21 ab	0,16 b
Balance Energético (MJ/l)		-1,70 c	-0,23 b	1,15 a

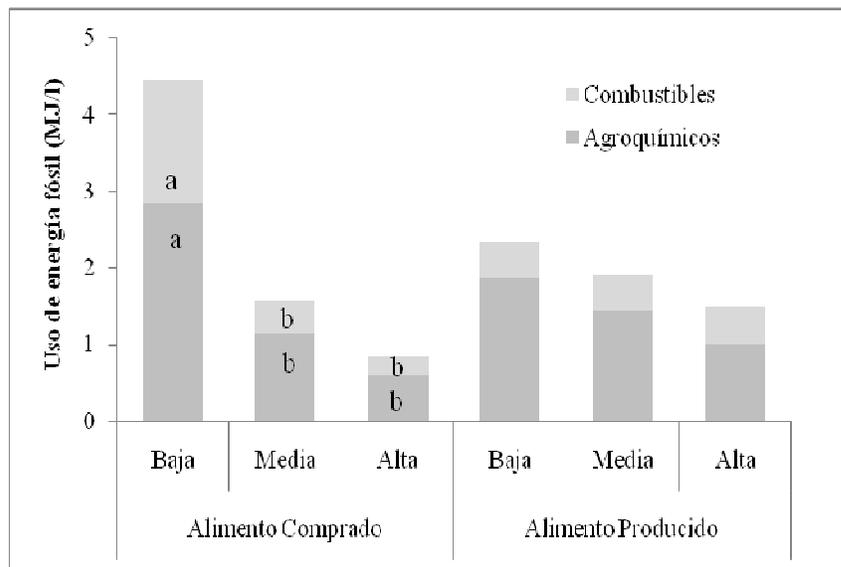
El estrato de baja eficiencia energética utiliza más energía para producir un litro de leche (Tabla 6) y esta diferencia se explica por un mayor uso de energía fósil. Los predios que más energía fósil consumen son los que presentan menor eficiencia energética ( $P < 0,0001$ ) (Figura 2). La relación entre eficiencia energética y consumo de energía fósil es inversamente proporcional.

Figura 2. Eficiencia energética en función del uso de energía fósil (MJ/l) para 30 predios lecheros del Uruguay.



A su vez, el mayor uso de energía fósil está determinado por un mayor costo energético del alimento comprado y el alimento producido (Tabla 6). El uso de energía fósil en los alimentos se puede desglosar en uso de agroquímicos y combustibles (Figura 4). La suma de energía fósil en los agroquímicos del alimento comprado y producido representa respectivamente el 64 %, 59 % y 53 % de la energía fósil consumida ( $P= 0,0245$ ), para los estratos bajo, medio y alto, mientras que la energía en los combustibles para alimento comprado y producido fue de 19 %, 21 % y 24 % de la energía fósil, no existiendo diferencia significativa entre ellos. Los estratos bajos usan más energía en agroquímicos y combustibles para el alimento comprado por litro de leche, pero no se encontró diferencia para agroquímicos y combustibles del alimento producido por litro de leche para los tres estratos, siendo el estrato bajo de igual forma el que mayor energía consume (Figura 3).

Figura 3. Uso de energía fósil en el alimento comprado y el alimento producido para producir un litro de leche, discriminado por el uso de la energía en los agroquímicos y combustibles, para 30 productores lecheros clasificados en tres estratos por su eficiencia energética: bajo, medio y alto. Valores con letras distintas entre barras son diferentes al 5% (Tukey).



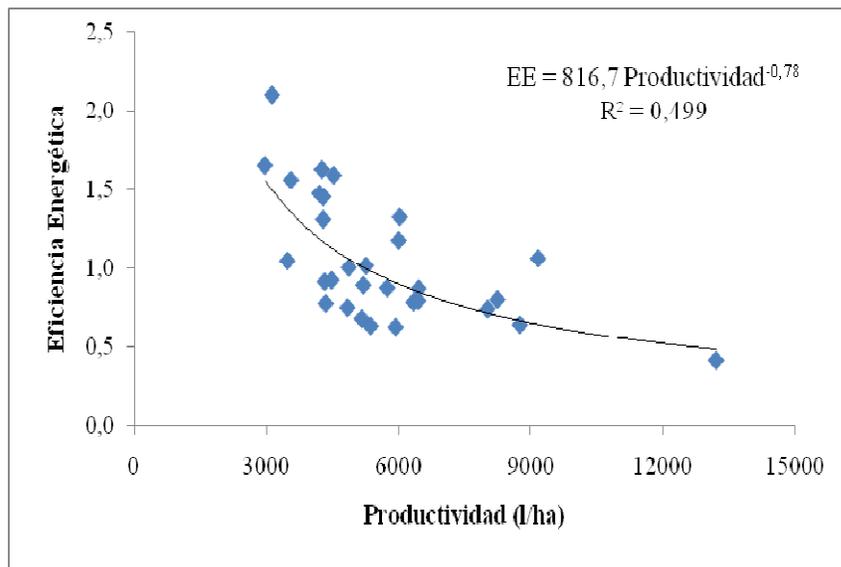
La tabla 7 presenta las variables tecnológicas de los tres estratos en función de la eficiencia energética. La proporción de pasturas en el alimento es superior en el estrato de alta eficiencia energética ( $P= 0,0387$ ). La proporción de concentrados en la dieta es mayor en el estrato de baja eficiencia ( $P= 0,0098$ ).

*Tabla 7. Promedios de productividad de leche por hectárea (l/ha) y por vaca masa (l/VM), dotación en equivalentes vaca lechera (EVL/ha) y vaca masa (VM/ha) y porcentaje del alimento consumido de pasturas, reservas y concentrado para 30 productores lecheros clasificados en tres estratos por su eficiencia energética. Valores con letras distintas en la misma fila son diferentes al 5% (Tukey).*

		Eficiencia energética		
		Baja	Media	Alta
Superficie (ha)		551	267	264
Productividad (l/ha)		6852 a	5733 ab	4338 b
Productividad (l/VM)		5959	5524	4995
Dotación (EVL/ha)		1,08	1,01	0,81
Dotación (VM/ha)		0,85 a	0,77 ab	0,58 b
Alimento (% MS total)	Pastura	52 b	60 ab	67 a
	Reserva	23	22	18
	Concentrado	25 a	18 ab	15 b

Los resultados indican que los predios de baja eficiencia energética tienen mayor productividad por unidad de superficie ( $P= 0,0242$ , Tabla 7) relacionado a una mayor dotación en VM ( $P= 0,0414$ ) con respecto a los predios de alta eficiencia energética. La Figura 4 evidencia una relación inversamente proporcional entre productividad y eficiencia energética ( $P= 0,0242$ ). Sin embargo, existe una dispersión en los datos, y la productividad explica el 50% de la variabilidad en eficiencia energética.

Figura 4. Eficiencia energética en función de la productividad (l/ha) para 30 predios lecheros del Uruguay



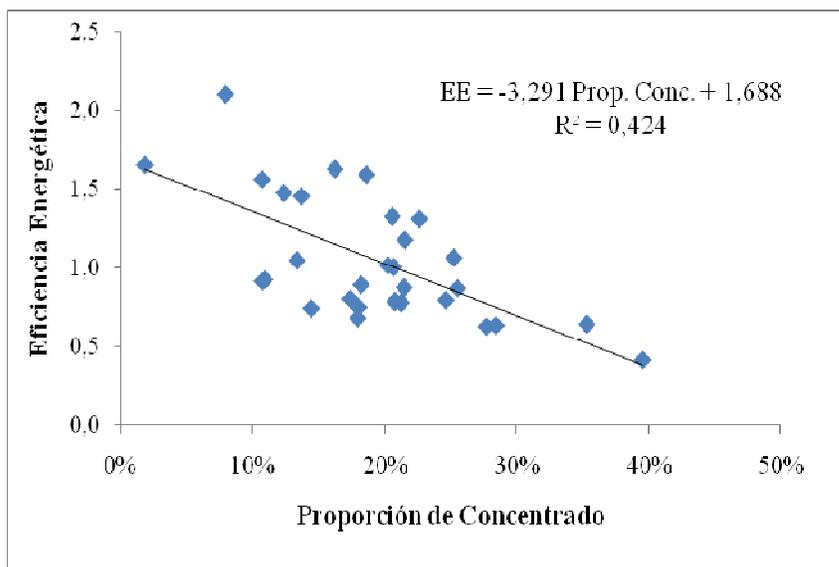
Se correlacionaron variables tecnológicas y energéticas (r de Pearson) con la eficiencia energética y el uso de energía fósil (Tabla 8), siendo en general las variables tecnológicas negativamente correlacionadas a la eficiencia energética, y positivamente al uso de energía fósil, a excepción de la proporción de pastura en el alimento consumido.

*Tabla 8. Correlación de las variables tecnológicas y energéticas con la eficiencia energética y el uso de energía fósil.*

	Eficiencia energética		Uso de energía fósil		
	R	P-valor	r	P-valor	
Variables Tecnológicas:					
Productividad por hectárea (l/ha)	-0,61	0,0004	0,69	<0.0001	
Productividad por vaca (l/VM)	-0,48	0,0100	0,55	0,0018	
Dotación (EVL/ha)	-0,52	0,0030	0,6	0,0005	
Dotación (VM/ha)	-0,56	0,0012	0,6	0,0005	
Alimento (% MS total)	Pastura	0,52	0,0031	-0,62	0,0003
	Reserva	-0,26	0,1600	0,32	0,0900
	Concentrado	-0,64	0,0001	0,7	<0.0001
Variables Energéticas:					
Energía fósil en alimento producido	-0,67	0,0005	0,59	0,0005	
Energía fósil alimento comprado	-0,62	<0.0001	0,81	<0.0001	
Energía fósil eléctrica	-0,37	0,0100	0,47	0,0100	
Energía en maquinaria	-0,54	<0.0001	0,73	<0.0001	

Se realizó un análisis de regresión múltiple de la eficiencia energética utilizando las 7 variables tecnológicas listadas en la tabla 8, mediante el procedimiento de Stepwise (forward) y la única variable que ingresó en el análisis fue el porcentaje de alimento concentrado. A mayor porcentaje de alimento concentrado en la dieta, menor eficiencia energética (Figura 5), aunque el porcentaje de concentrado explica solamente el 40% de la variación en eficiencia energética.

Figura 5. Eficiencia energética en función del porcentaje en alimento concentrado para 30 predios lecheros del Uruguay



## 2.5 DISCUSIÓN

El modelo construido para analizar la eficiencia energética de predios lecheros, permitió identificar las variables energéticas y tecnológicas que más se asocian a la eficiencia energética y al consumo de energía fósil.

Los resultados obtenidos para los 30 predios analizados muestra que a mayor intensificación (uso de concentrados y productividad de leche) la eficiencia energética es menor. En efecto, el aumento en productividad de leche no logra compensar el aumento en uso de energía fósil, explicado principalmente por el mayor uso de agroquímicos y combustibles en el alimento comprado.

Una comparación de la utilización de la energía para sistemas de diferentes países es difícil debido a las diferencias en las metodologías empleadas. En este sentido, los principales resultados de este trabajo son: los aspectos metodológicos (es decir la

construcción del modelo); y la comparación relativa entre los sistemas de producción del Uruguay. Los valores absolutos son comparables solo parcialmente con trabajos internacionales (Tabla 9). Los resultados de eficiencia energética de este trabajo se encuentran en un rango similar a los de Bochu (2002), con niveles de productividad similares (Tabla 9).

*Tabla 9. Eficiencia energética y productividad de leche en trabajos publicados usando diferentes metodologías en diferentes países.*

<b>Sistema estudiado</b>	<b>Eficiencia Energética</b>	<b>Productividad (l/ha)</b>	<b>Autor</b>
Predios lecheros en Francia (2)			Risoud, (1999)
convencional	0,97	1418	
ecológico	2,31	1844	
Predios en Argentina (2)			Denoia <i>et al.</i> , (2008)
Prod. de leche y de carne vacuna	0,20	3118	
Prod. lechero exclusivamente	0,20	10000	
Predios lecheros en Francia	1,45	6000	Bochu, (2002)
Predios lecheros en Uruguay (30)			
Estrato bajo	0,69	6852	Este trabajo
Estrato medio	0,94	5733	
Estrato alto	1,53	4338	

Las granjas ecológicas de Risoud (1999) presentan mayor eficiencia energética, pero la productividad muy por debajo a los predios estudiados en este trabajo. Ambos modelos son muy similares al presentado a diferencia que estos incluyen datos energéticos de transporte e infraestructura. Los resultados de Denoia *et al.* (2008), son inferiores a los presentados en este trabajo, explicados por las altas entradas de energía fósil de sus predios y al coeficiente energético menor utilizado para las salidas de leche y carne.

Los resultados para la energía fósil para producir un litro de leche (tabla 10) de Refsgaard *et al.* (1998), Le Gall *et al.* (2009), Rabier *et al.* (2010), Cedeberg y Mattsson (1998), son similares a los hallados en este trabajo para los estratos medio y alto, aunque todos presentan niveles de productividad diferentes.

Tabla 10. Uso de energía fósil (MJ/l) en trabajos publicados bajo distintas condiciones prediales en diferentes países.

Sistema estudiado	Uso de energía fósil (MJ/l)	Productividad (l/ha)	Autor
Pedios lecheros en Dinamarca			Refsgaard <i>et al.</i> (1998)
Granjas orgánicas (14)	2,66	7200	
Convencionales (17)	3,34	6900	
Pedios lecheros en Francia (4)			Le Gall <i>et al.</i> (2009)
Forrajeros	3,33	5000-9500	
Mixtos	3,80	6000-10000	
Pradera	3,44	4000-6000	
Montañas	3,76	3000-5500	
Pedios lecheros en Francia			Rabier <i>et al.</i> (2010)
Granja lecheras (3)	4,26	-	
Granja carne y leche (4)	5,62	-	
Pedios Lecheros en Suiza			Cedeberg y Mattsson (1998)
Orgánico	2,50	-	
Convencional	3,50	-	
Pedios en Argentina (2)			Denoia <i>et al.</i> (2008)
Prod. de leche y de carne vacuna	5,60	3118	
Prod. lechero exclusivamente	7,50	10000	
Pedios lecheros en Uruguay (30)			Este trabajo
Estrato bajo	4,58	6852	
Estrato medio	3,22	5733	
Estrato alto	2,04	4338	

Los datos presentados por Denoia *et al.* (2008), son superiores a los presentados en este trabajo, esto es a causa de cantidades superiores de energía fósil que entran al sistema. Si bien es difícil la comparación entre países, la mayoría de los trabajos indica que los predios con mayor grado de intensificación (mayor uso de insumos, mayor productividad) son los que usan mayor energía fósil, lo cual es consistente con nuestros resultados.

Los insumos que utilizan energía fósil para su elaboración son: fertilizantes, semillas, y los pesticidas. Los fertilizantes representan la principal fuente directa del consumo de energía (Pimentel *et al.*, 1973, Bel *et al.*, 1978). Los gastos energéticos representados por los agroquímicos son responsables por la mayor parte del uso de energía de los predios: 47 % (Bochu, 2002), 55 % (Risoud, 2000), 60 % (Meul *et al.*, 2007), 73% (Rabier *et al.*, 2010). Para los productores evaluados en este trabajo, los agroquímicos también contribuyen en gran medida al uso de energía del predio. En

sistemas que no utilizan fertilizantes, los pesticidas tienen una influencia en el consumo indirecto de energía total, pero su cantidad absoluta es baja (Clements *et al.*, 1995).

El gasto de energía fija en Maquinaria (Tabla 6) es menos del 11% un estudio global demostró que existe una alta variabilidad entre los diferentes enfoques metodológicos de este tema y los datos utilizados son generalmente no actualizados (Doering, 1980).

En la correlación (Tabla 8), se observa que la proporción del alimento en pasturas está positivamente asociada a la eficiencia energética del predio, lo que confirma que los sistemas de base pastoril, que usan mayor proporción de pasturas, son los que menos energía consumen para producir un litro de leche, al hacer un mayor uso de la energía solar (fotosíntesis).

En síntesis, en la muestra de predios lecheros analizados, se encontró una relación inversa entre la eficiencia energética y la productividad. La menor eficiencia energética de los predios de mayor productividad estaría explicada por un aumento en el consumo de energía fósil, principalmente por el uso de agroquímicos asociados al mayor consumo de alimento comprado, que no se acompaña de un aumento mayor en la producción de leche. Los predios que utilizan mayor proporción de pasturas en la dieta son los que presentan mejor eficiencia energética. Sin embargo, este trabajo también identificó predios con alta productividad y alta eficiencia energética, que deberán ser estudiados a futuro, para lograr diseñar sistemas de producción que optimicen productividad y eficiencia energética mediante un manejo adecuado de las pasturas y los suplementos.

## 2.6 BIBLIOGRAFÍA

- ASAE. 1993. (American Society of Agricultural Engineers), Agricultural engineers books, Arg. Mach. Mgt., Data: EP391 and D230.3, USA, St. Joseph.
- Astigarraga L., 2004. Desafíos técnicos de la intensificación. In “Intensificación en Lechería: la alternativa rentable”. FPTA 101, INIA-FUCREA, Facultad de Agronomía. 25 pp.
- Astigarraga L., De Mello N., Mattos F., 2003. Modelo de Decisión Lechero por Programación Lineal (CD rom). FPTA 101, INIA-FUCREA-Facultad de Agronomía
- Bel, F., Le Pape, Y., Mollard, A. 1978. Analyse Énergétique de la Production Agricole, Concepts et Methods. INRA-IREP, Grenoble, France. 163 p.
- Bochu, Jean-Luc, 2002. PLANETE Méthode pour l’analyse énergétique de l’exploitation agricoles et l’évaluation des émissions de gaz á effet de serre. In: Colloque National Quels Diagnostics pour Quelles Actions Agroenvironnementales. 10 et 11 octobre 2002, SOLAGRO, pp 68-80.
- Carnovale E; Marletta L. 2000. Tabelle di composizione degli alimenti. Istituto Nazionale di Ricerca per gli alimenti e la nutrizione. Aggiornamento 2000. Pozzoli S.P.A. Associazione Italiane editori. 30-36 p.
- Cederberg, C., Mattsson, B., 1998. Life cycle assessment of Swedish milk production, a comparison of conventional and organic farming. In: Ceuterick, D. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Life Cycle Assessment in Agriculture, Agro-Industry and Forestry, Brussels, Belgium, 3–4 December 1998, pp. 161–167.
- Clements, D.R., Weise, S.F., Brown, R., Stonehouse, D.P., Hume, D.J., Swanton, C.J., 1995. Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 52, 119–128.
- Denoia, J; Bonel, B; Montico, S; Di Leo, N. 2008. Análisis de la gestión energética en sistemas de producción ganaderos. Revista FAVE - Ciencias Agrarias 7 (1-2) 2008

- Doering, O.C., 1980. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: CRC Handbook of Energy Utilization in Agriculture, Boca Raton, Florida, pp. 9–14.
- Fluck, R. C. 1992. Input-output energy analysis for agriculture and the food chain. In: R. M. Peart, and R. C. Brook (Ed.) Analysis of Agricultural Energy Systems, p. 83. Elsevier, New York, NY.
- Funes Monzote, Fernando R., 2009. Eficiencia energética en sistemas agropecuarios. Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales (ACTAF).
- Gorrachategui Mariano García 1997. Influencia de la Nutrición y otros factores en el rendimiento de la canal en terneros. XIII Curso de especialización FEDNA. Madrid, 6 y 7 de Noviembre de 1997
- Hetz, E. A, Barrios. (1997). Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile. Agro-Sur, Vol. 24 (2): 146-161. Chillán, Chile.
- InfoStat. 2009 InfoStat Versión 2009 Grupo InfoStat Fac. Cs. Agrop., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- IFA. 1998. (International Fertilizer Industry Association), Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. Marrakech, Morocco. 19 p. (IFA Technical Conference)
- IPCC. 2007. (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.
- Le Gall, E Beguin, J.B. Dolle, V. Manneville, A. Pflimlin. 2009. Nouveaux compromis techniques pour concilier efficacité économique et environnementale en élevage herbivore. Fourrages. 198, 131-151
- Meul, M., F. Nevens, D. Reheul and G. Hofman. 2007. Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 119, Issues 1-2, Pages 135-144

- MGAP-DIEA 2010. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias. Estadística del Sector Lácteo 2009. Trabajos Especiales N° 295. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Uruguay, p 44.
- MIEM. 2011. (Ministerio de Industria Energía y Minería), Uruguay. (en línea). Departamento Nacional de Estadística. Consultado el 11 junio 2011. Disponible en <http://www.miem.gu.uy>
- Odum, H.T. y E.C. Odum, 1981. Hombre y Naturaleza. Bases Energéticas. Ed. Omega, Barcelona, España. 319 pp.
- Pimentel, D., Hurd, L.E., Belloti, A.C., Forster, M.J., Oka, I.N., Sholes, O.D., Whitman, R.J., 1973. Food production and energy crisis. *Science* 182:443–449.
- Rabier F., Mignon C., Lejeune L. and Stilmant D., 2010. Assessment of energy consumption pattern in a sample of Walloon livestock farming systems. Proceedings of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation Kiel, Germany August 29th - September 2nd 2010
- Refsgaard, Karen. Niels Halberg & Erik Steen Kristensenb 1998. Energy Utilization in Crop and Dairy Production in Organic and Conventional Livestock Production Systems. *Agricultural Systems*, Vol. 57, No. 4, pp. 599-630
- Risoud, Bernadette. 2000. Energy efficiency of various French farming systems: questions to sustainability. International Conference "Sustainable energy: new challenges for agriculture and implications for land use", Wageningen University, The Netherlands, May 18-20
- Risoud, Bernadette. 1999. Développement durable et analyse énergétique d'exploitations Agricoles In: *Économie rurale*. N°252, 1999. pp. 16-27.
- Tyrrell, H.F. and Reid, J.T. 1965. Prediction of the Energy Value of Cow's Milk. *J. Dairy Sci.* 48(9), 1215-1223
- West Tristan, Marland Gregg. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91: 217–232

### 3. IMPLICANCIAS Y RECOMENDACIONES

El objetivo de los modelos energéticos es evaluar el impacto ambiental del consumo de energía con respecto a la preservación del ambiente y ahorro de recursos fósiles, con el fin de ayudar a los productores agropecuarios a mejorar la gestión de la energía y mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción. En algunos de ellos, el análisis de la energía es sólo una parte de la evaluación de impacto ambiental debido a actividades humanas (Jolliet, 1994). Sin embargo, la elaboración de herramientas para evaluar los impactos ambientales debido a la agricultura constituye un requisito previo para desarrollar una producción agropecuaria sostenible, y para permitir una mejor gestión de los riesgos ambientales (Hansen, 1996).

La utilización de energía en la producción de cultivos y la producción de leche depende de decisiones de los productores sobre el uso de insumos y sus efectos sobre la producción. Por lo tanto, se trata en parte, de una cuestión de gestión. Podría ser interesante para algunos productores evaluar las posibilidades de reducir los costos energéticos en sus cultivos y la producción de leche. Los resultados obtenidos muestran que los productores del estrato de alta eficiencia energética son los que en promedio menos leche producen por superficie (l/ha). Esto nos conlleva a dilemas en la creación de políticas de estado para apoyar este sector productivo, ya que maximizar la producción y eficiencia son dos importantes objetivos nacionales. Por esta razón, es necesario profundizar estos estudios buscando identificar sistemas que logren a la vez alta productividad y eficiencia energética. Si bien la relación encontrada fue negativa, hay un 50% de la variación que está explicada por otros factores, que es imprescindible analizar a futuro.

La importancia del conocimiento de la eficiencia energética es el comienzo para la construcción de herramientas en el manejo de predios amigables con el medio

ambiente. De la capacidad del ser humano para manejar el flujo de energía en los sistemas de producción depende la provisión de alimentos para la humanidad y la sustentabilidad de los sistemas de producción (Paruelo y Baptista, 1999).

Los sistemas agropecuarios actuales, requieren cantidades altas y crecientes de insumos (Denoia *et al.*, 2008), lo que implica elevados costos energéticos. Por su parte, los sistemas ganaderos no han recibido hasta el presente la suficiente atención respecto a su análisis desde la perspectiva energética. La producción de leche está asociada al uso de altas cantidades de suplementos energéticos en la alimentación, modalidad de menor importancia en la actividad de invernada en sistemas no confinados (Denoia *et al.*, 2008). Esto indica que los análisis de eficiencia energética deben ser aplicados a otros rubros productivos de importancia nacional, como lo es la ganadería de carne.

Poder realizar análisis energéticos en mayor cantidad de productores nos permitiría hacer un mejor análisis de la situación actual de los predios lecheros. De igual forma utilizar modelos energéticos para comparar distintos sistemas de producción con tecnologías alternativas, que mejoren el rendimiento productivo, nos permitiría adaptar políticas de financiamiento e impulsar la productividad lechera.

Más allá de las conclusiones parciales respecto a la eficiencia energética de los predios lecheros analizados, la mayor contribución de este trabajo es la construcción del modelo, la síntesis de parámetros de bibliografía, su aplicación a condiciones de Uruguay, y la organización en planillas sencillas de manejo por técnicos, estudiantes, investigadores y productores.

En este sentido, si bien se considera que el modelo es muy completo y detallado, las limitaciones del actual modelo que deberían ser mejoradas en futuros trabajos son: que no se incluye el costo energético del transporte de los insumos al predio (posiblemente sea de muy bajo impacto, pero debería considerarse), no se incluye el

costo energético de la fabricación de la infraestructura del predio (edificios, instalaciones).

La capacidad de realizar estos estudios energéticos, debe estar acompañada de otros estudios interdisciplinarios, como es el caso de análisis económicos, sociales y ambientales, debido a que en los sistemas productivos muchas son las variables que intervienen. Este trabajo presenta limitantes para hacer un análisis global de aspectos fundamentales de interés para los productores. Los aspectos vinculados a estudios económicos, ambientales y sociales son fundamentales para los sistemas de producción, de allí la necesidad de incluirlos en futuros trabajos de investigación.

Para la producción láctea, se evidencia la necesidad de incrementar tanto la cantidad como la calidad del alimento para mejorar los rendimientos productivos. Dado que el alimento comprado incrementa el consumo energético en los sistemas estudiados, realizar investigaciones en la producción de cereales, oleaginosas y pastizales, para mejorar su eficiencia energética, ayudaría a mejorar la eficiencia energética en los sistemas de producción lechero. Mejorar la eficiencia energética de los cultivos en base al incremento de los rendimientos productivos y menor uso de fuentes energéticas de origen fósil, sería la clave para mejorar la eficiencia energética de los sistemas ganaderos y mantener una ventaja competitiva con otros países exportadores.

Otro de los aspectos fundamentales para mejorar la eficiencia energética, es el uso adecuado de las pasturas, tanto en producción como en utilización de las mismas. Por ejemplo, hay datos que indican el potencial que existe en las gramíneas perennes estivales (C4) para aprovechar la energía solar en la producción de biomasa, este puede ser un aspecto fundamental en la mejora de la eficiencia energética en los sistemas de producción lechero, analizando distintos sistemas de pastoreo y especies forrajeras.

Dentro de los aspectos energéticos que puedan mejorar un estudio oportuno de la eficiencia energética, se deben hacer comparaciones entre predios con distintos

sistemas de producción, este es el caso de sistemas orgánicos e intensivos ó de sistemas de producción con distintos manejos de pasturas, que puedan demostrar menor uso de la energía fósil y mayores rendimientos productivos por superficie, al igual que el uso de fuentes de energía renovables. De igual forma sería deseable poder contar con una base de datos más amplia que nos permita presentar mayor exactitud en las variables analizadas.

Esperamos que este trabajo abra un camino para futuros estudios de eficiencia energética a nivel agropecuario, que son esenciales para el desarrollo sostenible del país.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

- Abal G., D'Angelo M., Cataldo J. y Gutiérrez A.(2010. Mapa Solar del Uruguay. Versión 1.0. Memoria Técnica. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. 61 pp. Consultado el 11 junio 2011. Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/if/solar/>
- ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 1993. Agricultural engineers books, Arg. Mach. Mgt., Data: EP391 and D230.3, USA, St. Joseph.
- Astigarraga L., 2004. Desafíos técnicos de la intensificación. In “Intensificación en Lechería: la alternativa rentable”. FPTA 101, INIA-FUCREA, Facultad de Agronomía. 25 pp.
- Astigarraga L., De Mello N., Mattos F., 2003. Modelo de Decisión Lechero por Programación Lineal (CD rom). FPTA 101, INIA-FUCREA-Facultad de Agronomía.
- Bel, F., Le Pape, Y., Mollard, A., 1978, Analyse énergétique de la production agricole, Grenoble: INRA-IREP,163 p.
- Bochu, Jean-Luc, 2002. PLANETE Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricoles et l'évaluation des émissions de gaz á effet de serre. In: Colloque National Quels Diagnostics pour Quelles Actions Agroenvironnementales. 10 et 11 octobre 2002, SOLAGRO, pp 68-80.
- Bochu J. L., 2001. L'analyse énergétique: un outil pour mesurer l'autonomie des exploitations agricoles. Jour. Techniques, ITAB, pp 56-58.
- Bonny, S., 1993. Is agriculture using more and more energy? A French case study. Agricultural Systems 43, 51–66.
- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) (2006) The International System of Units (SI), 8th Edition. Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre, Paris. 17-27p
- Carnovale E; Marletta L. 2000. Tabelle di composizione degli alimenti. Istituto Nazionale di Ricerca per gli alimenti e la nutrizione. Aggiornamento 2000. Pozzoli S.P.A. Associazione Italiane editori. 30-36p

- Cederberg, C., Mattsson, B., 1998. Life cycle assessment of Swedish milk production, a comparison of conventional and organic farming. In: Ceuterick, D. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Life Cycle Assessment in Agriculture, Agro-Industry and Forestry, Brussels, Belgium, 3–4 December 1998, pp. 161–167.
- Clements, D.R., Weise, S.F., Brown, R., Stonehouse, D.P., Hume, D.J., Swanton, C.J., 1995. Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 52, 119–128.
- Denoia, J; Bonel, B; Montico, S; Di Leo, N. 2008. Análisis de la gestión energética en sistemas de producción ganaderos. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 7 (1-2) 2008
- Doering, O.C., 1980. Accounting for energy in farm machinery and buildings. In: *CRC Handbook of Energy Utilization in Agriculture*, Boca Raton, Florida, pp. 9–14.
- EIA (Energy Information Administration) . 2011. Independent statistic and analysis (en línea), Consultado el 20 octubre 2011. Disponible en <http://www.eia.gov>
- Fluck, R. C. 1992. Input-output energy analysis for agriculture and the food chain. In: R. M. Peart, and R. C. Brook (Ed.) *Analysis of Agricultural Energy Systems*, p. 83. Elsevier, New York, NY.
- Frank F. 2009 Curso internacional de agro-eco-index, INTA-Anguil, Argentina, 15 al 17 de abril del 2009. <http://www.inta.gov.ar/anguil/info/agroecoindex.htm>
- Funes Monzote, Fernando R., 2009. Eficiencia energética en sistemas agropecuarios. Elementos teóricos y prácticos para el cálculo y análisis integrado. Asociación Cubana de Técnicos Agrícolas y Forestales (ACTAF). Primera edición, Octubre 2009, p. 43
- Gerber Mathilde., 2002. Elaboration du modèle Dexi-SH: Modèle d'évaluation multicritère ex ante de la durabilité agro-écologique des systèmes d'élevage bovin laitier herbagers. Para la obtención de diplôme d'Ingénieur en Agriculture de l'Esitpa. 122 pp.

- Giampietro, M., Bukkens, S. G. F. and Pimentel, D., 1994. Models of energy analysis to assess the performance of food systems. *Agricultural Systems* 45, 1941.
- Gorrachategui Mariano García 1997. Influencia de la Nutrición y otros factores en el rendimiento de la canal en terneros. XIII Curso de especialización FEDNA. Madrid, 6 y 7 de Noviembre de 1997. 31 p.
- Guido Haas, Frank Wetterich, Ulrich Köpke 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83 (2001) 43–53
- Hansen, J.W., 1996. Is agricultural sustainability a useful concept? *Agricultural Systems* 50, 117–143.
- Hetz, E. A, Barrios. (1997). Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile. *Agro-Sur*, Vol. 24 (2): 146-161. Chillán, Chile.
- IEA. 2008. (International Energy Agency). *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency. Key Insights from IEA Indicator Analysis*. 94 p.
- IFA. 1998. (International Fertilizer Industry Association), *Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production*. Marrakech, Morocco. 19 p. (IFA Technical Conference)
- Iglesias Daniel H., 2004. *Uso de Indicadores para la evaluación de la Gestión Ambiental*. Seminario de sustentabilidad JICA - INTA. Res. Ejecutivos. 29 y 30 de marzo 2004. Buenos Aires.
- InfoStat. 2009 *InfoStat Versión 2009* Grupo InfoStat Fac. Cs. Agrop., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- IPCC. 2007. (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.
- Jolliet, O., 1994. Bilan écologique de procès des thermique, mécanique et chimique pour le défanage de pommes de terre. *Revue Suisse Agricole* 26 (2), 83–90.

- Le Gall, E Beguin, J.B. Dolle, V. Manneville, A. Pflimlin. 2009. Nouveaux compromis techniques pour concilier efficacité économique et environnementale en élevage herbivore. *Fourrages*. 198, 131-151
- McRae, T., Smith, C.A.S., Gregorich, L.J., 2000. Environmental Sustainability of Canadian Agriculture: Report of the Agri-Environmental Indicator Project. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ontario, 224 pp.
- Meul, M., F. Nevens, D. Reheul and G. Hofman. 2007. Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 119, Issues 1-2, Pages 135-144
- MGAP-DIEA 2010. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias. Estadística del Sector Lácteo 2009. Trabajos Especiales N<sup>o</sup> 295. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Uruguay, p 44.
- MIEM. 2011. (Ministerio de Industria Energía y Minería), Uruguay. (en línea). Departamento Nacional de Estadística. Consultado el 11 junio 2011. Disponible en <http://www.miem.gu.uy>
- Montico, S.; N. Di Leo; B. Bonel & J. Denoia. 2007. Gestión de la energía en el sector rural. UNR Editora. Colección Académica. 204 pp.
- Odum, H.T. y E.C. Odum, 1981. Hombre y Naturaleza. Bases Energéticas. Ed. Omega, Barcelona, España. 319 pp.
- Olivier, J.G.J., Bouwman, A.F., VanderHoek, K.W., Berdowski, J.J.M., 1998. Global air emission inventories for anthropogenic sources of NOX, NH3 and N2O in 1990. *Environmental Pollution* 102,135–148.
- Paruelo José M. y Batista William, 1999. El flujo de energía en los ecosistemas. Consultado el 11 Agosto 2011. Disponible en: <http://www.itescham.com/Syllabus/Doctos/r1181.PDF>
- Pimentel, D., T.W. Patzek., 2005. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel, Production Using Soybean and Sunflower, *Natural Resources Research*, 14, 65 (March 2005).

- Pimentel, D., Hurd, L.E., Belloti, A.C., Forster, M.J., Oka, I.N., Sholes, O.D., Whitman, R.J., 1973. Food production and energy crisis. *Science* 182:443–449.
- Rabier F., Mignon C., Lejeune L. and Stilmant D., 2010. Assessment of energy consumption pattern in a sample of Walloon livestock farming systems. Proceedings of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation Kiel, Germany August 29th - September 2nd 2010
- Refsgaard, Karen. Niels Halberg & Erik Steen Kristensen 1998. Energy Utilization in Crop and Dairy Production in Organic and Conventional Livestock Production Systems. *Agricultural Systems*, Vol. 57, No. 4, pp. 599-630
- Risoud, Bernadette. 2000. Energy efficiency of various French farming systems: questions to sustainability. International Conference "Sustainable energy: new challenges for agriculture and implications for land use", Wageningen University, The Netherlands, May 18-20
- Risoud, Bernadette. 1999. Développement durable et analyse énergétique d'exploitations Agricoles In: *Économie rurale*. N°252, 1999. pp. 16-27.
- Tyrrell, H.F. and Reid, J.T. 1965. Prediction of the Energy Value of Cow's Milk. *J. Dairy Sci.* 48(9), 1215-1223
- Viglizzo E, Frank F, Bernardos J, Buschiazzo D, Cabo S. 2006. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the pampas of Argentina. *Environ Monit Assess* 117:109–134.
- Viglizzo E., Domingo A., Castro M. y Lértora A., 2002. La sustentabilidad ambiental del agro pampeano. Programa Nacional de Gestión ambiental Agropecuaria. ISBN 987-521-052-8. Ediciones INTA.
- West Tristan, Marland Gregg. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91: 217–232

## 5. ANEXOS

### Anexo 1. Instrucciones para utilizar el modelo AGROENERGÍA

Es un modelo que permite calcular la eficiencia energética de predios lecheros (cociente energía producida sobre energía consumida), y el consumo de energía (en Mega Joules, MJ) para obtener un litro de leche. . Las entradas de energía se estiman sumando el costo energético en MJ/año de distintos insumos (plaguicidas, fertilizantes, insecticidas, combustibles, mano de obra, maquinarias, electricidad, etc.) en distintas actividades agropecuarias (arada, rastreada, siembra, fumigación, alimentación, etc.). Las salidas de energía se cuantifican para leche y carne. El modelo consta de cinco hojas de cálculo Excel (2010): ingreso de datos al predio, coeficientes energéticos, resultados, gráficas y hoja auxiliar. El modelo busca identificar los puntos críticos en las actividades agropecuarias que más influyen sobre la eficiencia energética, para poder mejorar el manejo de los predios lecheros. A continuación se detalla cada hoja de cálculo del modelo.

- Ingreso de datos: La primera hoja permite ingresar datos de identificación del predio (nombre, productor, superficie, mano de obra), y datos productivos incluyendo: litros de leche/año, stock de animales y ventas, los Kg/año de alimento comprados (maíz, sorgo, afrechillo de trigo, soja, pellet de girasol, sustituto lácteo, alimentos concentrados), Kg/año de agroquímicos y semillas, y las ha/año de maquinaria utilizada en las diferentes actividades agrícolas en el predio (pasturas, silo y fardo tanto de verano e invierno, silo de grano húmedo, cultivos de granos y mantenimiento). Los datos incluidos deben pertenecer a un año o ejercicio. En el caso de presentar el predio ventas de alimento o de insumos agrícolas del año previo, se puede ingresar en las celdas de venta de productos agrícolas; de igual forma si presenta diferencia de inventario (stock de productos o insumos al final del año

menos el stock inicial), se debe restar de dicha celda. Para la utilización de maquinaria, se procede a ingresar las cantidades de hectáreas que se trabajaron, el tipo de tractor y los implementos utilizados para la labor.

- La segunda hoja llamada valores energéticos, utiliza los datos productivos suministrados en la hoja de datos y realiza los cálculos energéticos en base a cada coeficiente energético, también totaliza la energía utilizada en cada una de las actividades agrícolas, la energía aportada utilizada en las maquinarias y el alimento comprado como una fuente externa de energía que ingresa al predio, la misma se complementa con la hoja 5. Esta hoja no puede ser modificada por el usuario.
- La tercera hoja es de resultados, en ella se muestra la EE en el predio, la energía consumida y producida (total y por hectárea), MJ por litro de leche, la distribución de la energía (Combustible, electricidad, agroquímicos, energía fija en maquinaria y mano de obra) haciendo una partición entre las diferentes actividades agrícolas y el alimento comprado, también muestra el costo energético de la energía fósil (EF) y la energía no fósil (EnoF) utilizada en el predio. Esta hoja no puede ser modificada por el usuario.
- Una cuarta hoja presenta las gráficas de: Energía Total en Actividades Agrícolas, energía en Insumos por actividad Agrícola, Costos Energéticos para la Producción en General y % de energía fósil y no fósil. En ella se puede observar gráficamente cuales son los requerimientos energéticos que realiza el productor en su labores agrícolas y tomar medidas para mejorar el sistema productivo en base a parámetros energéticos. Esta hoja no puede ser modificada por el usuario.
- Una quinta hoja auxiliar presenta los cálculos energéticos para los alimentos comprados, en base a los datos locales de producción para el año 2009 y el costo energético del proceso industrial de los alimentos balanceados, harinas y afrechillo. Se puede hacer cambios en la proporción del alimento balanceado, ajustándolos a los tipos de formula que indican los fabricantes de alimento, sin embargo no se puede modificar otro parámetro de la hoja.

Para mayor información escribir un correo a [edullan20@gmail.com](mailto:edullan20@gmail.com).

Anexo 2. Modelo AGROENERGÍA en formato digital (se encuentra en el CD de la tesis)