

Eficiencia energética en sistemas lecheros del Uruguay

Llanos Eduardo^{1,3}, Astigarraga Laura¹, Jacques Ruben² y Picasso Valentín^{1,3}

¹*Departamento de Producción Animal y Pasturas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: edullan20@gmail.com*

²*Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay.*

³*Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay.*

Recibido: 17/9/12 Aceptado: 20/9/13

Resumen

Reducir el consumo de energía fósil y aumentar la eficiencia energética de los predios agropecuarios resulta en 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. El modelo incluyó como entradas los costos energéticos de alimentos, mano de obra, electricidad, agroquímicos, combustibles y maquinaria, y como salidas la producción de leche y carne. Se analizó una base de datos de 30 predios lecheros del sur de Uruguay, remitentes a la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (Conaprole), organizados en tres estratos en base a su productividad de leche por hectárea. El uso de energía fósil para producir un litro de leche fue de 2,40; 3,63 y 3,80 MJ.L⁻¹ para los estratos de productividad bajo, medio y alto respectivamente (P<0,01). Los promedios de eficiencia energética fueron 1,40; 0,90 y 0,86 para los mismos estratos (P<0,01). La energía fósil de los agroquímicos y los combustibles representó más del 80% de la energía consumida para los tres estratos. A mayor porcentaje de concentrado en la dieta, menor fue la eficiencia energética (P<0,01). Estos resultados sugieren la existencia de una relación negativa entre la intensificación productiva y eficiencia energética.

Palabras clave: energía fósil, balance energético, intensificación, sustentabilidad

Summary

Energy Efficiency of Dairy Systems in Uruguay

Reducing fossil fuel consumption and increasing energy efficiency of agricultural systems may result in environmental and economic benefits. The aim of this study was to analyze dairy production systems from an energy perspective, to identify the main variables affecting energy efficiency and fossil energy consumption, through a model of inputs and outputs. The model included as inputs energy costs of food, labor, electricity, agrochemicals, fuels and machinery, and as outputs dairy and meat production. We analyzed a database of 30 dairy farms from southern Uruguay, from the Cooperativa Nacional de Productores de Leche (Conaprole), organized in three strata based on their dairy productivity per hectare. The fossil energy use was 2.40, 3.63 y 3.80 MJ.L⁻¹ for productivity strata low, medium and high respectively (P<0.01). Energy efficiency averages were 1.40, 0.90 y 0.86 for the same strata (P<0.01). Fossil energy of agrochemicals and fuel accounted for more than 80% of the energy consumed in the three strata. The greater the percentage of concentrate in the diet, the lower energy efficiency (P<0.01). These results suggest the existence of a negative relationship between the intensification of dairy production and energy efficiency.

Keywords: fossil energy, energy balance, intensification, sustainability

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). El uso ineficiente de la energía puede resultar en impacto ambiental (Meul *et al.*, 2007). Minimizar el consumo de energía fósil es un objetivo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático global (Parry *et al.*, 2007). Aumentar la eficiencia energética y diversificar la matriz energética con fuentes no fósiles son objetivos de las políticas energéticas a nivel mundial, incluido Uruguay (Dirección Nacional de Energía Planificación y Balance, 2011). La transformación de los alimentos en productos (carne y leche), constituye una etapa ineficiente en términos energéticos (Denoia *et al.*, 2008). 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, 2010). La base del sistema de producción es pastoril, aunque 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 al igual que en Argentina presentan una variabilidad relativa en términos de uso de insumos por unidad de superficie en comparación con otros países europeos, China, Japón, Nueva Zelanda y Estados Unidos (Viglizzo *et al.*, 2011), que los torna interesantes para estudiar el impacto del grado de intensificación sobre el consumo de energía fósil y su eficiencia energética. Además existe interés del sector industrial lácteo por incluir indicadores de calidad ambiental de la producción en el análisis de la performance productiva de los predios.

La intensificación de los sistemas lecheros está asociada al uso de concentrados y reservas, lo cual permite aumentar la productividad de leche y la salida de energía. El uso de concentrados implica a su vez un aumento en el consumo de energía fósil del sistema. Dado que aumentan a la vez el consumo y la salida de energía, no está claro el efecto neto en la eficiencia energética. La hipótesis de este trabajo fue que a mayor intensificación de los sistemas de producción (medida en términos de productividad de leche por hectárea y de consumo de alimentos concentrados), aumentaría la eficiencia energética. El objetivo de este estudio fue analizar distintos sistemas de producción de leche desde el punto de vista energético, para identificar las prin-

cipales variables que inciden en el consumo de energía fósil y la eficiencia energética. Para ello se planteó: 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 el consumo de energía fósil para un conjunto de predios lecheros del sur del Uruguay; 3. identificar las variables tecnológicas asociadas en mayor medida a la eficiencia energética y el consumo de energía fósil con énfasis en la intensificación productiva.

Materiales y métodos

Estructura del modelo

En la Figura 1 se presentan las principales características del modelo «AGROENERGÍA» utilizado para cuantificar las entradas y las salidas de energía del sistema de producción de leche a nivel del predio. El productor puede incidir en al menos tres puntos para mejorar la eficiencia energética del sistema: 1. la cantidad de insumos entrantes, 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.

El modelo de cálculo «AGROENERGÍA» se realizó en una planilla Microsoft Excel 2007 con tres hojas. Las características del sistema productivo 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, raciones), 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 de uso y producción de energía se realizan en la segunda hoja, en base a las ecuaciones y coeficientes energéticos que se detallan más adelante. Los resultados de los cálculos se presentan en la tercer hoja: energía consumida y producida (total, por hectárea y por litro de leche), eficiencia energética, la proporción del consumo de energía en maquinaria, en mano de obra, en alimento comprado, en actividades agrícolas y en alimento producido dentro del predio y sus componentes (combustible, electricidad, agroquímicos), separando en uso de energía fósil y energía no fósil.

Los coeficientes energéticos y los criterios de cálculo tomados de la bibliografía nacional e internacional se pre-

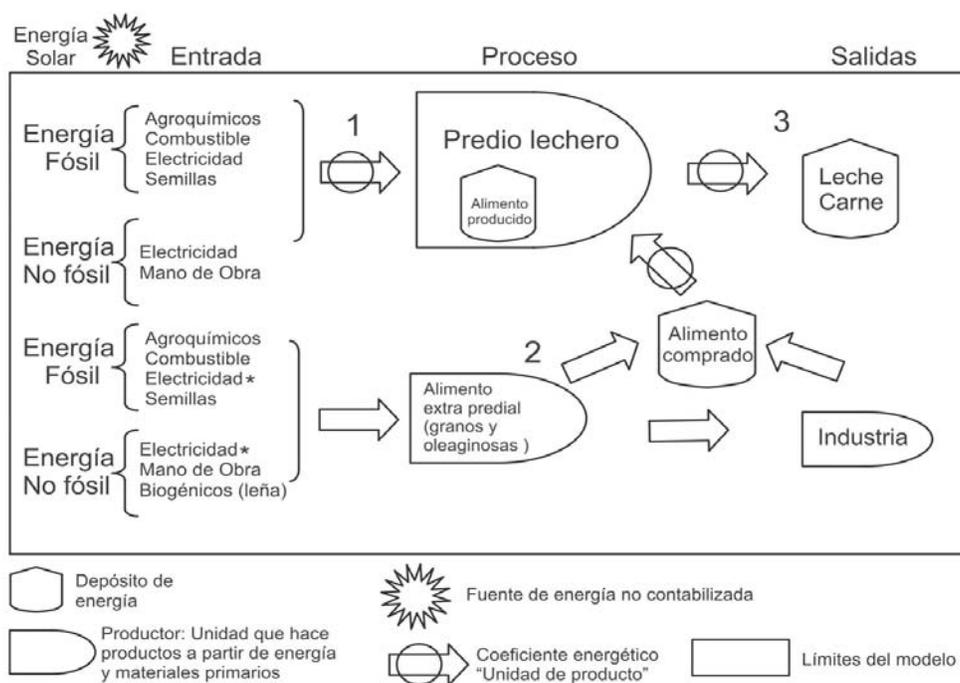


Figura 1. Diagrama del modelo energético utilizado para cuantificar las entradas y las salidas de energía del sistema de producción de leche a nivel del predio.

*La matriz de distribución de energía eléctrica se basa en energía fósil (derivados del petróleo) como de no fósil (hidroeléctrica y termoeléctrica).

sentan en la Cuadro 1. Para el alimento comprado que entró al sistema, se calculó el costo energético de la producción de granos y oleaginosas. Para esto, se utilizaron los coeficientes energéticos del Cuadro 1, y rendimientos de cultivos y parámetros técnicos de producción de datos nacionales de la Cooperativa COPAGRAN de Soriano para el año agrícola 2009 (Rafael Vidal, com. pers.) presentados en el Cuadro 2. A los alimentos concentrados como expeller o raciones balanceadas se adicionó un gasto energético en el proceso industrial requerido para su fabricación, para la cual se tomaron datos de producción del Molino San José (Andrés Ferrari, com. pers.): en la preparación de 10 ton de alimentos balanceados se usaron 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.

Se utilizó la metodología para cuantificar los costos energéticos de operaciones de maquinaria presentada por Hetz y Barrios (1997), 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 por unidad de superficie (MJ.ha⁻¹), 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. El Cuadro 3 muestra los valores energéticos calculados para diferentes actividades agrícolas en función del número de operaciones de maquinaria agrícola necesarias.

La energía contenida en los productos se calculó sumando la energía de la leche producida y de la carne producida, multiplicando la producción de leche (L) o carne (kg) por el valor energético de cada uno de ellos (MJ.l⁻¹ y MJ.kg⁻¹ respectivamente). El valor energético de la leche se calculó a partir de la ecuación de Tyrrell y Reid (1965), en función de los porcentajes de grasa y proteína de la leche. Para la carne se calculó a partir de la adición del valor energético contenido en músculos, esqueleto, órganos, depósito de grasa, piel y tracto digestivo (Gorriategui, 1997). Con el peso de los animales y la proporción de los diferentes tejidos que lo conforman, se calculó el valor energético de cada componente del animal utilizando las tablas propuestas por Carnovale y Marletta (2000).

El análisis se basó en un año de producción. La eficiencia energética se calculó como el cociente entre energía producida y energía consumida (Odum y Odum, 1981). El

Cuadro 1. Criterios, coeficientes energéticos utilizados para el cálculo de energía fósil y no fósil incluida en el modelo AGROENERGIA.

Tipo	Entrada (unidad)	Energía (MJ/unidad)	Criterio	Cita
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 2000-2009.	MIEM Uruguay (2011)
	Leña (kg)	11,3	Para 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 en bomba calorimétrica.	MIEM Uruguay (2011)
	Electricidad (kW-h)	1,15	Representa un 32% energía proveniente de fuentes de energía fósil, promedio 2000-2009.	MIEM Uruguay (2011)
	Herbicidas (kg)	266,6	Incluye la formulación de los principios activos en aceites emulsionables, polvos mojables, o gránulos, embalaje y transporte.	West y Marland (2002)
	Insecticidas (kg)	284,8		
	Fungicidas (kg)	288,9		
	Urea 46-0-0 (kg)	54		
	Amonio Nitrato 35-0-0 (kg)	46,6	El modelo de IFA simplificado utiliza gas natural como fuente de producción de amoníaco (80% de la producción mundial)	IFA (1998)
	Mono Amonio Fosfato 11-52-0 (kg)	4,3		
	Triple Superfosfato 0-48-0 (kg)	7		
	Semilla Sorgo (kg)	43,5		
	Semilla Trigo (kg)	6,6		
	Semilla Maíz (kg)	53,3	Incluye la limpieza y envasado de la semilla. Consiste en un 50, 20, y 30% mezcla de fuel-oil, gas natural y electricidad, respectivamente (Börjesson, 1996).	West y Marland (2002)
	Semilla Trébol Rojo (kg)	87		
Semilla Raigrás (kg)	27,4			

balance energético se calculó como la energía producida menos la energía consumida. Los valores de balance energético mayores a cero corresponden a eficiencia energética 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 (fertilizantes, herbicidas, pesticidas, etc.) 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).

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

Se utilizaron los registros productivos de 30 predios remitentes a la cooperativa Conaprole, para el ejercicio económico 2009-2010 (de condiciones climáticas relativamente promedio para el país), ubicados en la región sur del Uruguay, en los departamentos de Colonia, San José, Canelones y Maldonado. La cooperativa suministró la base de

Cuadro 2. Rendimientos, fertilizantes, agroquímicos y operaciones de maquinaria utilizadas para los cálculos y costo energético de los alimentos comprados.

	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Fertilizantes (kg ha ⁻¹) ⁽¹⁾	Otros agroquímicos (kg ha ⁻¹) ⁽²⁾	Pasadas de maquinaria ⁽³⁾	Energía (MJ kg ⁻¹)
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
Pradera	5000	100	1	5	2,1
Balanceado recría					6,4
Ración de ternero					5,7
Balanceado invernada					5,2

⁽¹⁾ Incluye N, P, K. ⁽²⁾ Incluye herbicidas, insecticidas y fungicidas. ⁽³⁾ Incluye número de pasadas de sembradora, pulverizadora, cosechadora. Fuentes: Rafael Vidal, com. pers. Andrés Ferrari, com. pers.

Cuadro 3. Operaciones de maquinaria supuestas para los cálculos y 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 que corresponde a combustibles y lubricantes.

Actividad Agrícola	Operaciones de maquinaria	Energía tractor (MJ/ha ⁻¹)	Energía implemento (MJ/ha ⁻¹)	% de energía en combustibles
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

Cuadro 4. Promedios, máximos, mínimos y coeficiente de variación para variables productivas y tecnológicas de 30 predios lecheros del Uruguay.

	Promedio	Máximo	Mínimo	CV (%)
Superficie (ha)	358	1448	46	92
Productividad por hectárea (l ha ⁻¹)	5640	13209	2978	38
Productividad por vaca (l/VM)	5492	8581	2758	21
Dotación (EVL ha ⁻¹)	0,97	1,81	0,57	30
Dotación (VM ha ⁻¹)	0,73	1,38	0,34	34
Alimento consumido (kg MS ha ⁻¹)				
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

datos buscando cubrir la diversidad de productividad existente, seleccionando tres grupos de igual cantidad de predios pertenecientes a tres estratos de productividad (menor a 4500 L.ha⁻¹, entre 4500-6000 L.ha⁻¹ y mayores a 6000 L.ha⁻¹). Los registros incluyen la información productiva de los predios, datos de variables estructurales (superficie, tenencia, maquinaria agrícola) y tecnológicas (uso de la tierra, conservación de forrajes stock de animales, suplementación) y se resumen en el Cuadro 4.

Análisis estadístico

Para las variables tecnológicas y energéticas incluyendo uso de energía fósil, eficiencia energética, balance energético, productividad de leche por hectárea y uso de concentrado, 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 lineal simple y de regresión lineal múltiple (Stepwise) para estudiar la relación entre eficiencia energética y variables tecnológicas del predio. Se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT.

Resultados y discusión

Uso de energía fósil

El coeficiente de variación entre predios para el consumo de energía fósil fue de 38%, indicando que existe variabilidad entre los predios. El uso de energía fósil para producir un litro de leche fue de 2,40; 3,63 y 3,80 MJ.L⁻¹ para los estratos de productividad bajo, medio y alto respectivamente ($P < 0,01$, Cuadro 5). Estos valores están dentro de lo reportado en la literatura internacional para predios lecheros pastoriles, ubicándose hacia el límite inferior (ver Cuadro 7). Los predios uruguayos del estrato de baja productividad presentaron similar uso de energía fósil que los predios orgánicos de Suiza (Cedeberg y Mattsson, 1998) y Dinamarca (Refsgaard *et al.*, 1998), mientras que los predios uruguayos del estrato de media y alta productividad tuvieron un uso de energía fósil similar a predios convencionales de Suiza y Dinamarca, y predios pastoriles de Francia (Le Gall *et al.*, 2009; Cuadro 7). Los valores de predios uruguayos analizados presentaron inferior uso de energía fósil que los reportados por Denoia *et al.* (2008) en Argentina. Más adelante se discuten las posibles razones de estas diferencias.

Cuadro 5. Promedios de variables energéticas y tecnológicas para tres estratos de predios lecheros del Uruguay clasificados por productividad de leche por hectárea. Valores con letras distintas en la misma fila son diferentes al 5% (Tukey).

	Estrato de productividad			
	Baja	Media	Alta	
Energía producida (MJ l ⁻¹)	3,45	3,33	3,31	NS
Energía consumida (MJ l ⁻¹)	2,66 b	3,96 ab	4,26 a	*
Uso de energía no fósil (MJ l ⁻¹)	0,26	0,33	0,46	NS
Uso de energía fósil (MJ l ⁻¹)				
Total	2,40 b	3,63 a	3,80 a	*
Actividades agrícolas	1,54	2,09	1,71	NS
Alimento Comprado	0,58 b	1,18 ab	1,70 a	*
Energía Eléctrica	0,10	0,13	0,17	NS
Equipo Maquinaria	0,18	0,23	0,22	NS
Eficiencia energética	1,40 a	0,90 b	0,86 b	*
Balance energético (MJ l ⁻¹)	0,80 a	-0,63 b	-0,96 b	*
Superficie (ha)	396	426	251	NS
Productividad (l ha ⁻¹)	3897 b	5150 b	7875 a	*
Productividad (l/VM)	4692 b	5595 ab	6190 a	*
Dotación (EVL ha ⁻¹)	0,75 b	0,88 b	1,27 a	*
Dotación (VM ha ⁻¹)	1,14 b	1,21 b	1,63 a	*
Alimento (% MS total)				
Pastura	69% a	55% b	55% b	*
Reserva	18%	25%	23%	NS
Concentrado	13% b	20% a	25% a	*

Los estratos de alta y media productividad consumieron más energía para producir un litro de leche que el estrato de baja productividad (Cuadro 5) y esta diferencia se explica por un mayor uso de energía fósil. El mayor uso de energía fósil está asociado a un mayor uso de alimento concentrado comprado fuera del predio y no está asociado a mayor costo energético de actividades de producción de alimento en el predio (Cuadro 5). La energía fósil utilizada en agroquímicos y combustibles (suma de energía fósil en actividades agrícolas y alimento comprado) representó más del 80% de la energía consumida para los tres estratos. Los predios del estrato de productividad medio y alto usaron mayor energía fósil en agroquímicos y combustibles ($P < 0,05$), siendo los valores: 2,12 MJ.l⁻¹; 3,27 MJ.l⁻¹ y 3,41 MJ.l⁻¹ para los estratos de productividad bajo, medio y alto respectivamente. La variable tecnológica que más se asoció al uso de energía fósil fue el porcentaje de la materia seca de la dieta

que se consumió de concentrados (Cuadro 6). Es decir, que en los predios lecheros estudiados, el mayor uso de energía fósil se debe a un mayor uso de alimentos concentrados, mayormente comprados fuera del predio, que tienen un alto costo de combustibles y agroquímicos. Estos resultados son consistentes con los reportados en predios europeos por Refsgaard *et al.* (1998) y Cedeberg y Mattsson (1998), donde el mayor uso de energía en los sistemas convencionales respecto a los orgánicos proviene de la producción de alimentos concentrados fuera del predio y el uso de fertilizantes. Le Gall *et al.* (2009) argumentan que los sistemas lecheros a base de praderas de gramíneas y leguminosas usan menos energía que los de montaña que se basan en concentrados (Cuadro 7). Hay acuerdo en la bibliografía que los fertilizantes representan la principal fuente del consumo de energía (Pimentel *et al.*, 1973; Bel *et al.*, 1978; Clements *et al.*, 1995). Los gastos energéticos repre-

Cuadro 6. Coeficientes de regresión lineal simple (b_0 y b_1), de determinación (R^2) y valores de significancia (P) para las variables dependientes eficiencia energética y uso de energía fósil en función de variables tecnológicas y energéticas, para 30 predios lecheros del Uruguay.

	Eficiencia energética				Uso de energía fósil			
	b_0	b_1	R^2	P	b_0	b_1	R^2	P
Variables Tecnológicas:								
Productividad por hectárea ($l\ ha^{-1}$)	1,69	-0,00011	0,37	0,0004	1,04	0,0004	0,48	<0,0001
Productividad por vaca (l/VM)	1,98	-0,00017	0,23	0,0067	0,01	0,0006	0,30	0,0018
Dotación ($EVL\ ha^{-1}$)	1,75	-0,72	0,27	0,003	0,82	2,54	0,36	0,0005
Alimento (% MS total)								
Pastura	0,17	1,48	0,27	0,0031	6,53	-5,46	0,38	0,0003
Reserva			0,07	0,1608			0,10	0,0875
Concentrado	1,68	-3,23	0,41	0,0001	1,16	10,97	0,49	<0,0001
Variables Energéticas:								
Energía fósil en alimento producido	1,72	-0,37	0,45	0,0001	1,44	1,03	0,35	0,0005
Energía fósil en alimento comprado	1,38	-0,28	0,38	0,0003	1,97	1,13	0,66	<0,0001
Energía fósil eléctrica	1,26	-1,55	0,14	0,0423	2,47	6,03	0,22	0,0096
Energía en maquinaria	1,61	-2,64	0,29	0,002	0,96	11,03	0,53	<0,0001

sentados por los agroquímicos (incluidos los fertilizantes) 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). Esto también es consistente con lo encontrado por Viglizzo *et al.* (2006) para predios en Argentina, donde a mayor área en cultivos agrícolas, mayor uso de energía fósil. A pesar de que las metodologías utilizadas en la bibliografía internacional no son homogéneas y utilizan diferentes supuestos (por ejemplo, Cedeberg y Mattsson, 2000, no incluyen los costos energéticos de la maquinaria, Refsgaard *et al.* 1998 no incluyen la mano de obra, ni consideran la carne como producto, etc.), la mayoría de los trabajos indica que los predios con mayor grado de intensificación (mayor uso de insumos, mayor productividad) son los que usan más energía fósil, lo cual es consistente con nuestros resultados.

Eficiencia energética

La eficiencia energética fue mayor en el estrato de productividad bajo con respecto al estrato medio y alto ($P < 0,01$) siendo la eficiencia del estrato bajo casi el doble que el estrato alto (Cuadro 5). Los resultados de eficiencia energética de este trabajo se encuentran en un rango similar a los reportados en Francia por Bochu (2002), con niveles de productividad similares (Cuadro 7) y a los reportados en Argentina por Frank (2007) para 200 predios agropecuarios. El coeficiente de variación entre predios para la eficien-

cia energética fue de 37%. Análogamente, el balance energético fue positivo para el estrato de baja productividad, y negativo para los estratos medio y alto (Cuadro 5). Las diferencias en eficiencia y balance energético se deben a diferencias en la energía consumida por litro de leche, y no a diferencias en energía producida por litro de leche (Cuadro 5). Esto nuevamente se asocia directamente con la dieta de los sistemas: los sistemas con mayor uso de concentrados tienen menor eficiencia energética. La variable tecnológica que más se asoció (en forma negativa) a la eficiencia energética fue el porcentaje de concentrado en la dieta (Cuadro 6). Las eficiencias energéticas encontradas por Denoia *et al.* (2008) en Argentina son menores a las presentadas en este trabajo, explicadas por un mucho mayor uso de energía fósil en los predios analizados (Cuadro 7). La eficiencia energética de los predios lecheros reportados por Risoud (1999) no es comparable con los de nuestros predios, ya que son sistemas de mucho menor producción de leche que los analizados en este trabajo (Cuadro 7).

La eficiencia energética resultó ser más dependiente del consumo de energía fósil (es decir, del uso de insumos como agroquímicos y combustibles) que de la producción de leche. Empíricamente, la eficiencia energética no fue dependiente de la energía producida (en leche y carne), sino de la energía consumida. La relación entre eficiencia energética y consumo de energía fósil resultó inversamente proporcional, siendo la ecuación obtenida: Eficiencia ener-

Cuadro 7. Eficiencia energética, uso de energía fósil y productividad de leche en trabajos publicados en la literatura internacional.

País y sistemas estudiados	N	Eficiencia energética	Uso de energía fósil (MJ l ⁻¹)	Productividad (l ha ⁻¹)
Francia (Risoud, 1999)	2			
Biológica		0,97		1481
Convencional		2,31		1844
Francia (Bochu, 2002)		0,20-1,93		6000
Francia (Le Gall <i>et al.</i> , 2009)	4			
Forrajeros			3,33	5000-9500
Mixtos			3,80	6000-10000
Pradera			3,44	4000-6000
Montañas			3,76	3000-5500
Francia (Rabier <i>et al.</i> , 2010)	7			
Lecheros únicamente	3		4,26	
Carne y leche	4		5,62	
Suiza (Cedeberg y Mattsson, 1998)	2			
Orgánico			2,5	
Convencional			3,5	
Dinamarca (Refsgaard <i>et al.</i> , 1998)	31			
Orgánicos	14		2,66	7200
Convencionales	17		3,34	6900
Argentina (Denoia <i>et al.</i> , 2008)	2			
Lecheros y de carne vacuna		0,2	5,6	3118
Lechero exclusivamente		0,2	7,5	10000
Uruguay (este trabajo)	30			
Estrato bajo	10	0,69	4,58	6852
Estrato medio	10	0,94	3,22	5733
Estrato alto	10	1,53	2,04	4338

gética = 3,396 * Uso de Energía Fósil^{-1,0}, (R² = 0,975, P<0,01).

La proporción del alimento en pasturas está lineal y positivamente asociada a la eficiencia energética del predio (Cuadro 6). 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). Se realizó un análisis de regresión lineal múltiple para explicar qué variables inciden más en la eficiencia energética utilizando las variables tec-

nológicas listadas en el Cuadro 6, mediante el procedimiento de Stepwise 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 2, Eficiencia energética = - 3,23 proporción de concentrado + 1,68, R²=0,41 P<0,001).

La Figura 3 evidencia una relación inversamente proporcional entre la eficiencia energética y la productividad de leche, que se ajusta adecuadamente a una ecuación exponencial negativa (Eficiencia energética = 817 productividad^(-0,783),

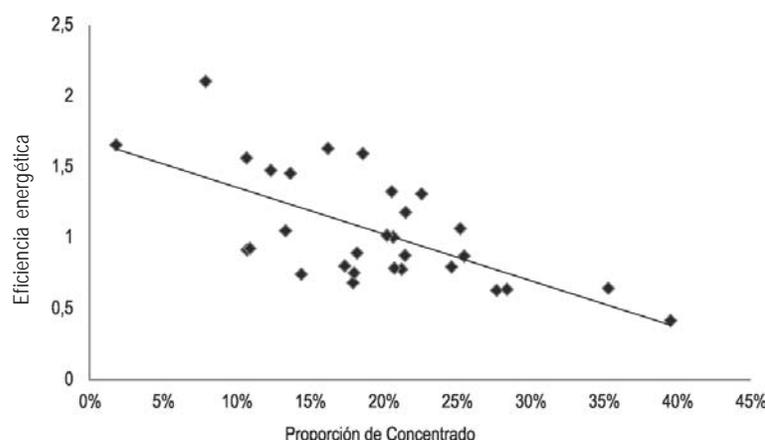


Figura 2. Eficiencia energética en función de la proporción de alimento concentrado en el consumo total de materia seca para 30 predios lecheros del Uruguay.

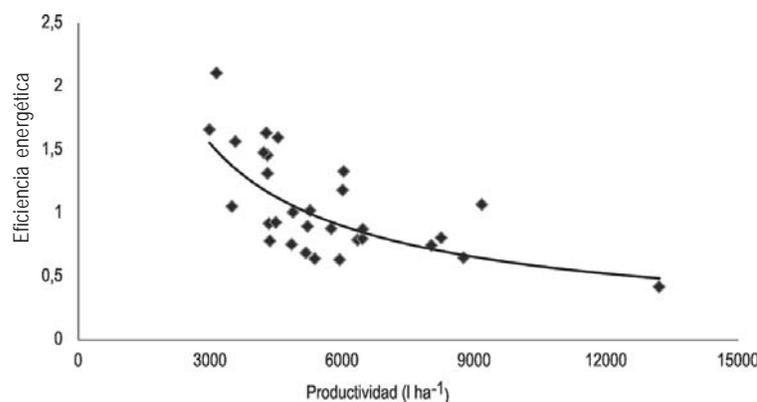


Figura 3. Eficiencia energética en función de la productividad de leche para 30 predios lecheros del Uruguay.

$P < 0,05$, $R^2 = 0,499$). Esta relación se explica porque la eficiencia energética se calculó como el cociente entre energía producida y la energía consumida, en ambos casos expresada por unidad de producto (MJ.l^{-1}). El numerador de dicha ecuación resultó independiente de la productividad de leche ($p = 0,5077$), ya que coincide aproximadamente con el valor energético de la leche. El denominador, en cambio depende directamente de los insumos utilizados, y empíricamente resultó una función lineal de la productividad: ($E_{\text{Consumida}} = 0,0005 \text{ productividad} + 0,94$, $P = 0,0001$, $R^2 = 0,54$). Por lo tanto, la eficiencia energética resulta ser el cociente entre una constante y una función lineal de la productividad, que se representa adecuadamente por una ecuación exponencial negativa. Sin embargo, existe una alta dispersión en los datos, y la productividad explica menos del 50% de la variabilidad en eficiencia energética. Esto indica que existen predios de igual productividad con diferente eficiencia energética, lo cual indica

que existen diferencias en el manejo de los predios, posiblemente en la eficiencia del aprovechamiento del pasto, que permiten mejorar la eficiencia energética.

Los resultados sugieren que en los predios analizados, a mayor intensificación medida en términos de 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 concentrado comprado.

Conclusiones

Para el grupo de predios lecheros de Uruguay analizados, se encontró que el consumo de energía fósil es relativamente bajo comparado con la bibliografía internacional, y la eficiencia energética es relativamente alta. Esto posiciona a los sistemas lecheros pastoriles uruguayos en una situación positiva respecto a la competitividad internacional vin-

culada a aspectos ambientales. Por otro lado, se encontró una relación inversa entre la eficiencia energética y la intensificación. 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 proporcionalmente mayor en la energía producida en leche. Los predios que utilizan mayor proporción de pasturas en la dieta son los que presentan mayor eficiencia energética. Esto fundamenta la importancia de promover la producción pastoril eficiente en la lechería uruguaya. Adicionalmente, la dispersión de los resultados permitió identificar predios con alta productividad y alta eficiencia energética, que deberán ser foco de futuros estudios en profundidad. Posiblemente, la eficiencia del uso del pasto y del suplemento concentrado sea la clave para optimizar productividad y eficiencia energética. Esta línea de investigación debe continuarse para lograr diseñar y promover sistemas de producción lecheros sustentables.

Bibliografía

- ASAE. 1993. Agricultural engineers books. St. Joseph : ASAE.
- Astigarraga L. 2004. Desafíos técnicos de la intensificación [En línea]. En: Intensificación en Lechería: la alternativa rentable. Montevideo: INIA, CREA. (FPTA; 101). pp. 33 - 58. Consultado 26 setiembre 2013. Disponible en: <http://www.fucrea.org/userfiles/Informacion/Items/1195.pdf>.
- Bel F, Le Pape Y, Mollard A. 1978. Analyse énergétique de la production agricole, concepts et methods. Grenoble: INRA. 163p.
- Bochu JL. 2002. PLANETE Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricoles et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. En: Colloque National Quels Diagnostics pour Quelles Actions Agroenvironnementales; 10-11 octobre 2002, Toulouse, Francia. Toulouse: SOLAGRO. pp. 68 - 80.
- Carnovale E, Marletta L. 2000. Tabelle di composizione degli alimenti. Roma: INRAN. 140p.
- Cederberg C, Mattsson B. 2000. Life cycle assessment of milk production—a comparison of conventional and organic farming. *Journal of Cleaner Production*, 8(1): 49-60.
- Clements DR, Weise SF, Brown R, Stonehouse DP, Hume DJ, Swanton CJ. 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*, 7(1-2): 43-56.
- DIEA. 2010. Estadística del Sector Lácteo 2009 [En línea]. Montevideo : MGAP. 41p. (Serie Trabajos Especiales ; 295). Consultado 26 setiembre 2013. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/agxppdwn.aspx?7,5,118,O,S,0,2127%3BS%3B4%3B120,>.
- Dirección Nacional de Energía Planificación y Balance. 2011. Balance energético nacional. [En línea]. 29p. Consultado 30 setiembre 2013. Disponible en: <http://www.dne.gub.uy/documents/15377/64382/3-BALANCE%20ENERG%C3%89TICO%202011.pdf>
- Fluck RC. 1992. Input-output energy analysis for agriculture and the food chain. En: Peart RM, Brook RC. [Eds.] *Analysis of Agricultural Energy Systems*. New York: Elsevier. p. 83.
- Frank FC. 2007. Impacto agroecológico del uso de la tierra a diferentes escalas en la región pampeana de Argentina [Tesis de Maestría]. Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 164p.
- Funes Monzote FR. 2009. Eficiencia energética en sistemas agropecuarios : Elementos teóricos y prácticos [En línea]. Matanzas : Universidad de Matanzas. 37p. Consultado 26 setiembre 2013. Disponible en: http://www.actaf.co.cu/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=682&cf_id=24.
- Gorrrachategui MG. 1997. Influencia de la Nutrición y otros factores en el rendimiento de la canal en terneros [En línea]. En: XIII Curso de especialización FEDNA; 6 - 7 noviembre 1997; Madrid, España. pp. 133 - 169. Consultado 26 setiembre 2013. Disponible en: http://fundacionfedna.org/sites/default/files/97CAP_VI.pdf
- Hetz E, Barrios A. 1997. Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile. *Agro-Sur*, 24(2): 146-161.
- IFA. 1998. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. Marrakech : IFA. 19p.
- Le Gall E, Beguin JB, Dolle, V, Manneville, A, Pflimlin. 2009. Nouveaux compromis techniques pour concilier efficacité économique et environnementale en élevage herbivore. *Fourrages*, 198: 131-151.
- Meul M, Nevens F, Reheul D, Hofman G. 2007. Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(1 - 2): 135-144.
- Odum HT, Odum EC. 1981. Hombre y naturaleza : Bases Energéticas. Barcelona : Omega. 319p.
- Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE. 2007. *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge : Cambridge University Press. 976p.
- Pimentel D, Hurd LE, Belloti AC, Forster MJ, Oka IN, Sholes OD, Whitman RJ. 1973. Food production and energy crisis. *Science*, 182: 443-449.
- Rabier F, Mignon C, Lejeune L, Stilmant D. 2010. Assessment of energy consumption pattern in a sample of Walloon livestock farming systems. En: Proceedings of the 23th General Meeting of the European Grassland Federation; 29 agosto - 2 setiembre 2010; Kiel, Germany. Duderstadt : Mecke Druck und Verlag. pp. 121-123.
- Refsgaard K, Halberg N, Kristensen ES. 1998. Energy utilization in crop and dairy production in organic and conventional livestock production systems. *Agricultural Systems*, 57(4): 599-630.
- Risoud B. 2000. Energy efficiency of various French farming systems: questions to sustainability. En: International Conference Sustainable energy : new challenges for agriculture and implications for land use; 18-20 Mayo; Wageningen, Netherlands. Wageningen : Wageningen University. 9p.
- Risoud B. 1999. Développement durable et analyse énergétique d'exploitations Agricoles. *Économie rurale*, 252: 16-27.
- Tyrrell HF, Reid JT. 1965. Prediction of the energy value of cow's milk. *Journal of Dairy Science*, 48(9): 1215-1223.
- Viglizzo EF, Frank FC, Carreño LV, Jobbágy EG, Pereyra H, Clatt J, Pincén D, Ricard FM. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17(2): 959-973.
- Viglizzo EF, Frank FC, Bernardos J, Buschiazzi DE, Cabo S. 2006. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the Pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117: 109-134.
- West T, Marland G. 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.