

# BALANCE ENERGÉTICO DE LA TRANSFORMACIÓN DE MAÍZ EN UNA PLANTA INTEGRAL ARGENTINA

Hilbert J.A.<sup>1</sup>, Galbusera S.<sup>2</sup>, Carballo S.<sup>3</sup>, Schein L.<sup>4</sup>, Dantur A.<sup>5</sup>,  
Galban M.J.<sup>6</sup>, Manosalva J.<sup>1</sup>, Michard N.<sup>3</sup>

1. Inst. de Ing. Rural INTA

2. Consultor INTEASA

3. Inst. Clima y Agua INTA

4. Univ. Nac de Lujan

5. ACABIO

6. Univ. Nac. Villa María

c.c. 25 Castelar 1141434394 jorgeantoniohilbert@gmail.com

## Resumen

Los retornos energéticos han estado siempre en discusión en relación a los biocombustibles y en especial para aquellos derivados del almidón de maíz. La evolución tecnológica y los diferentes criterios han arrojado resultados muy diferentes a lo largo de los últimos años planteando controversias sobre el tema. En este contexto, ante la necesidad de mejorar el conocimiento sobre los retornos energéticos y las reales emisiones de GHG a lo largo de la cadena de producción del bioetanol en Argentina surge el II acuerdo entre la empresa ACABIO, y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), para el análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero y el retorno energético de cada una de los productos generados en la biorefinería. El balance energético se construyó por etapas convirtiendo el empleo de insumos en su equivalente energético de acuerdo a bases de datos y modelos reconocidos a nivel mundial. La etapa agrícola tuvo en cuenta el consumo directo de combustibles y lubricantes así como los demás insumos con su correspondiente equivalencia energética para producirlos. Se utilizaron criterios de asignación por masa y precio así como se realizaron diferenciaciones de consumos en la asignación a los diferentes productos generados. Según la apropiación por línea realizada el bioetanol alcanzaría un número de 3,29 unidades de energía obtenida por cada unidad de energía invertida. El promedio general de todos los productos considerados fue de 2,61. Se debe aclarar que este ejercicio a pedido de la empresa se incorporó la energía de los fletes marítimos lo cual perjudica el valor final.

**Palabras clave:** TRE, biorefinerías, energía

## Abstract:

Cornstarch ethanol has been studied with different criteria for the last 20 years. Ethanol is not the only product created during production and different criteria together with the technological improvements caused great discrepancy between results. In this context in order to evaluate the new cornstarch bioethanol distilleries in Argentina, a complete study was performed with great concern on the different

byproducts produced by an agreement between INTA and ACABIO. Steps were taken, converting each input in its energy equivalence constructed the energy balance, according to literature. In the feedstock production, the fuels and agrochemicals were taken into account. Mass and economic allocation criteria were employed and special treatment was performed on specific consumptions related to the products generated. According to the appropriation by line of products bioethanol reached 3,29 units of energy produced by unit invested. The mean value for the different coproducts was 2,61. This numbers could be improved since the international transportation by ship was included..

Keywords: EROI, biorefinery, energy

## Introducción:

Nos encontramos frente a un marcado interés de parte de diferentes actores de la sociedad en los vectores energéticos alternativos así como a los demás productos derivados de la transformación de biomasa en biorefinerías.

La demanda de productos “sustentables” se sigue incrementando lo cual implica un compromiso de toda la cadena de suministro. Esta evolución combinada con la necesidad de diversificar las fuentes energéticas para reducir la dependencia del petróleo y derivados, y de encontrar combustibles de transición hacia una nueva generación de fuentes de energía ha llevado a diversos países del mundo, a desarrollar políticas tendientes a fomentar el uso de biocombustibles. Estas políticas han sido multiplicadas con crecientes incorporaciones de biocombustibles en su matriz energética y la Argentina se ha constituido en un país líder en esta materia por su arquitectura jurídica así como sus niveles de participación en los mercados de combustibles

Desde el inicio de la difusión y puesta en marcha de la producción de biocombustibles a nivel mundial tres temas han estado siempre en la mesa de discusión y controversia, estas son los balances energéticos, la competencia con los alimentos y la preservación del medio ambiente. Hoy en día estos cuestionamientos se están expandiendo hacia otros productos de la mano de crecientes exigencias por parte de grandes cadenas de supermercados.

La acción de diferentes centros de investigación, organismos no gubernamentales ecologistas y partes interesadas han instalado con fuerza el tema de las amenazas que se presentan ante una expansión irrestricta de la producción de biocombustibles en el mundo así como el impacto de la producción agrícola. El bioetanol de maíz ha sido particularmente cuestionado dado su relativo menor balance energético y la no comprensión integral del uso múltiple que tienen la industrialización del grano en el mercado energético y de alimentación animal. La revisión bibliográfica arroja diversos resultados con una gran disparidad motivados fundamentalmente en la evolución tecnológica, la mejora en los procesos industriales así como incremento de rendimientos agrícolas (Shapouri et al 2002). Por otro lado los temas relacionados con el establecimiento de los límites de los estudios así como los criterios y metodologías de asignación de la energía entre los diferentes productos generados en las biorefinerías bajo estudio es una temática a resolver a fin de hacer posible la comparación entre los trabajos realizados Flugge, M., et al 2017. Estos fueron los motivos que impulsaron comenzar a realizar una serie de estudios tendientes a lograr el cálculo del retorno energético de los principales biocombustibles argentinos.

La planta bajo estudio pertenece a ACABIO y ocupa un terreno ubicado sobre la Autopista N° 9 Rosario Córdoba, al kilómetro 555, Municipio de Villa María, departamento General San Marín, provincia de Córdoba. Un convenio entre la empresa y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA permitió el desarrollo de un estudio integral que abarco los aspectos energéticos y ambientales de toda la cadena de transformación del maíz incluyendo a todas las etapas.

Se conoce como Tasa de retorno energético (TRE) o, en inglés, EROEI, ERoEI (energy returned on energy invested), EROI (energy return on investment), al cociente de la cantidad de energía total que es capaz de producir una fuente de energía y la cantidad de energía que es necesario emplear o aportar para explotar ese recurso energético:

$$TRE = \frac{E_{\text{total fuente}}}{E_{\text{invertida}}}$$

Un cociente menor o igual que 1 indica que la energía de la fuente es menor o igual a la energía consumida. Por el contrario, un cociente mayor que 1 indica que la energía total es mayor que la energía invertida y queda, en consecuencia, un saldo neto positivo. Una fuente de energía será tanto mejor cuanto mayor sea su TRE, puesto que eso implica que se obtiene una mayor cantidad de energía neta utilizable por cada unidad de energía invertida en ella. Por el contrario, una tasa de retorno inferior a la unidad implica que esa fuente no es rentable en términos energéticos: para su funcionamiento consume más energía de la que produce.

En la bibliografía Flugge, M., et al 2017 se detectaron una serie de estudios sobre este tema ligados a la producción de bioetanol a partir de almidón de maíz así como son consideraciones respecto a efectos indirectos en discusión. En todos ellos los cálculos tienen dos resultados el primero se refiere a solo considerar como salida de la biorefinería el bioetanol y los segundos tienen en cuenta la energía contenida en los subproductos ver tabla 1.

Tabla 1 Datos referenciales de Estados Unidos plantad de bioetanol en Estados Unidos

Referencias	TRE s/créditos	TRE c/créditos
USDA - Autor Gallagher	1,52	2,15 - 2,30
Christianson&Assoc.	1,73	2,60 - 2,80
Mueller&Kwik	1,71	2,60 - 2,80

La evolución de la tecnología empleada ha tenido un impacto positivo en los balances los trabajos más recientes como los de Gallagher 2006 cuyos resultados fueron superiores aproximadamente entre un 25-35% a los estimados en 2002 por Shapouri et al. Esto demuestra un progreso continuo en la eficiencia energética de la producción de etanol de maíz durante la última década.

## Materiales y métodos

El balance energético se construyó por etapas convirtiendo el empleo de insumos en su equivalente energético de acuerdo a bases de datos y modelos reconocidos a nivel mundial. La etapa agrícola tuvo en cuenta el consumo directo de combustibles y lubricantes así como los demás insumos con su correspondiente equivalencia energética para producirlos.

Se incluyó en el cálculo del EROEI el gasto energético de las actividades e insumos utilizados para producir bioetanol, desde la producción agrícola, fletes de MMPP, Planta Industrial ACABio, y los fletes de producto elaborado. Se tomaron los contenidos energéticos de los combustibles según los datos del MinEM (Balance Energético Nacional). En el caso de la producción de insumos se tomaron valores del BioGrace (V4), y en el de los insumos de planta valores de literatura (explicitados en la hoja “Cuadro F. FE Insumos Planta” del calculador). Finalmente se realizó la misma apropiación energética por etapas que para el “Análisis Apropiación Línea”. Finalmente se realizaron las tres apropiaciones de los consumos comunes, y se calculó el EROI con apropiación por coproductos o como si el único producto fuera el bioetanol.

El calculador fue desarrollado mediante una serie de hojas de cálculo en planilla Excel versión 2016, con tablas dinámicas. El sistema completo contiene cuenta con la totalidad de la información de referencia, planillas de ingreso y de sensibilidad y evaluaciones del para el mercado externo y nacional

En la hoja de entrada se ingresaron los datos correspondientes a la producción y consumo de insumos y energía de la Planta Villa María elaborados por la empresa en una planilla completa que contiene los datos mensuales. También se incluyeron los fletes de producto terminado y de insumos. Posteriormente se realizó el cálculo de las emisiones asociadas, y los consumos energéticos necesarios para estimar el EROI. También se realizó el cálculo de los porcentajes de asignación por coproductos según los criterios de masa, energía y económicos.

Con respecto a la energía involucrada en la producción primaria a campo se realizó una asignación de materia prima por localidades y se los asimiló a las zonas representativas de los campos relevados. Se tabularon y utilizaron consumos medios por región de acuerdo a los resultados de casos testigo relevados teniendo en cuenta consumos de combustibles, fertilizantes y agroquímicos para el cálculo del EROI.

Tabla 2 Calculo de la Energía invertida en la etapa agrícola de producción de maíz

Etapa Agrícola

	Produccion (TN)	Energia (Gj)	
ProduccionMaiz (TN) (=recepcion en planta)	318.008	306.275	
Insumos/combustibles	Cantidad (Lts o Kgs)	Contenido Energetico (Kcal/Lt o kg) - Mj/kg	Energia (Gj)
Consumo Gasoil (Laboreos)	1.186.875	8.619	42.830
Consumo Nafta (Laboreos)		7.607	
Comnsumo Lubricantes (Laboreos)	142.425	8.503	5.070
Produccion de combustibles (Laboreos) (EnergiaFosilProduccion)			4.617
N aplicado (Kg N) (EnergiaFosilProduccion)	.477.663	49	72.392
P2O5 aplicado (Kg P2O5) (EnergiaFosilProduccion)	563.526	15	8.584
K2O aplicado (Kg K2O) (EnergiaFosilProduccion)		10	
S aplicado (Kg S) (EnergiaFosilProduccion)	95.539		
Agroquimicos (todos) (EnergiaFosilProduccion)	643.752	268	172.783

La etapa de fletes consideró sobre la base de las declaraciones de transportes y kilómetros recorridos la inversión total realizada para proveer a la empresa. Para todos los casos se consideró la vuelta en vacío de todos los transportes involucrados. Con respecto a los insumos empleados en la planta se calculó el consumo teniendo en cuenta las fuentes de suministro primarias de la empresa.

Tabla 3 Calculo de la inversión energética en transporte

	Produccion (TN)	Contenido Energetico (Kcal/Lt o kg) - Mj/kg	Energia (Gj)
ProduccionMaiz (TN) (=recepcion en planta)	318.008		45.275
Consumo Gasoil (Transpote a planta)	1.144.338	8.619	41.295
Produccion de combustibles (Transporte a planta) (EnergiaFosilProduccion)			3.980

La etapa industrial fue dividida en siete partes: recepción, molienda y fermentación, destilación, secado, consumos comunes y planta recuperadora y procesadora de dióxido de carbono. Se asignó de acuerdo con la información suministrada por la empresa entre las diferentes etapas el vapor y la energía eléctrica. De acuerdo a los datos de referencia se convirtieron los consumos energéticos en su equivalencia ente los diferentes combustibles empleados. En una segunda etapa se individualizaron los consumos propios de cada etapa y los comunes que no pueden ser asignados inclusivamente a ellas. Sobre esta base se realizaron las asignaciones ex-períficas y las comunes se dividieron de acuerdo a un criterio común.

Tabla 4 Análisis de cada una de las etapad de la planta de procesamiento y transformación de maíz.

Tabla de asignacionenergi a	Recepcion	Molienda y fermentacion	Destilacion	Separacion	Secado	Consumoscomunes	Planta co2
Vapor	0,00%	15,83%	84,17%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Energía Electrica	8,60%	20,40%	6,30%	9,00%	8,70%	34,90%	12,10%
Asignacion Energía Electrica / Vapor / Secado	Energía (Gj)	Asignacion a Generacion	Energía (Gj)	% asignado EE	Energía (Gj)	% asignado Vapor	Energía (Gj)
Emisiones EnergiaElectrica Comprada a la Red	522	100%	522	100%	522		
Fuel-Oil (incluyetransporte)	158.250	100%	158.250	30%	47.475	7 %	110.775
Gas natural	970.689	76%	737.723	30%	221.317	70%	516.406
Total (Gj)	1.129.461		896.496		269.314		627.181

Con la totalidad de la información se construyó una tabla resumen donde se incluyeron los consumos totales invertidos en energía en cada una de las etapas.

En la hoja específica de energía se realizó el cálculo utilizada final de acuerdo a la información de producción de bioetanol y coproductos. Se consideró la misma apropiación por productos que se realiza en la “Apropiación por línea”. Se alocó la energía de acuerdo a los procesos involucrados en cada uno de los productos separando los exclusivos y distribuyendo los comunes en cada una de las etapas involucradas. Finalmente se calculan la tasa de retorno energético EROI tomando en cuenta la totalidad de coproductos o solo el bioetanol

Tabla 5 Distribución de la Energía entre los diferentes productos generados en la empresa

<b>Apropiación por Energía</b>	<b>Alcohol</b>	<b>DDGS</b>	<b>WDGS</b>	<b>Aceite</b>	<b>CO2</b>
Etapas comunes a todos los co-productos	63%	15%	20%	1%	0%
Etapas exclusivas DDGS/WDGS/Aceite		42%	55%	3%	
Etapas exclusivas DDGS/WDGS		43%	57%		
Etapas Exclusivas CO2					100%
Etapas Exclusivas Alcohol	100%				
Etapas Exclusivas WDGS			100%		
Etapas Exclusivas DDGS		100%			
Etapas Exclusivas Aceite Vegetal				100%	
Etapas Exclusivas CO2					100%

### **Resultados y discusión:**

La tabla 6 contiene los resultados obtenidos, se tiene en cuenta la energía invertida en cada una de las etapas según la apropiación por línea realizada el bioetanol alcanzaría un número de 3,29 unidades de energía obtenida por cada unidad de energía invertida. El promedio general de todos los productos considerados fue de 2,61. Se debe aclarar que este ejercicio a pedido de la empresa se incorporó la energía de los fletes marítimos lo cual perjudica el valor final.

Si todos los consumos se adjudicaran solamente al bioetanol, es decir que no se realizara ninguna asignación energética por producto el valor se reduciría a 1,64 como puede apreciarse en el cuadro el cual se compara con los valores encontrados en la bibliografía reciente para plantas de este tipo.

Para el tratamiento de la energía contenida en los diferentes insumos así como su flete se le asignaron los valores totales calculados para cada uno de ellos a las etapas industriales en las cuales se los utiliza a modo de criterio general.

Tabla 6 Resultados finales alcanzados

<b>Apropiación por Energía</b>	<b>Alcohol</b>	<b>DDGS</b>	<b>WDGS</b>	<b>Aceite</b>	<b>CO2</b>	<b>Total</b>
Producción (TN)	104.674	46.926	172.212	1.489	11.157	<b>36.457</b>
Energía Invertida x línea (Gj)	870.038	362.045	454.360	16.987	38.067	<b>1.741.498</b>
Energía x Producto terminado (GJ)	2.858.637	705.714	932.275	56.927		<b>4.553.555</b>
Balance de energía x línea (GJ)	1.988.600	343.669	477.915	39.940	38.067	<b>2.812.057</b>
Tasa de retorno energético (EROEI)	3,29	1,95	2,05	3,35		2,61
Solo considerando bioetanol						<b>1,64</b>

### **Conclusiones**

Se ha logrado desarrollar una metodología de cálculo y asignación que permitió una mejora en la precisión del valor final de acuerdo a diferentes criterios a seleccionar. Se obtuvieron los primeros valores de referencia de eficiencia energética de este tipo de plantas en la Argentina. Los valores se corresponden con los mejores resultados obtenidos en la literatura.

Existe un importante campo de mejora en la etapa agrícola y de transporte. El peso relativo de la producción primaria del cultivo es significativa en el cálculo total por lo tanto es necesario continuar trabajando a fin de obtener datos referenciales que representen una parte significativa de la materia prima que entra en la planta.

Para una mejor asignación de las emisiones de energía eléctrica a las diversas etapas del proceso es necesario saber cuál es el consumo real involucrado de manera que las cifras sean verificables y auditables. A tal propósito, la implementación por parte de ACABIO de sistemas de medición y registro de energía para sus actividades por unidades principales, podrían ser incorporados en los calculadores de los próximos ejercicios.

La inclusión de la territorialidad y temporalidad (análisis de la evolución de los resultados) en este tipo de estudios marca una incipiente tendencia a nivel nacional y mundial y se pretende continuar en esta línea profundizando los estudios para lograr la incorporación de dichos aspectos metodológicos a las PCR (Reglas de Categoría de Productos) para que puedan luego plasmarse en el desarrollo de los Environmental Product Declaratios EPD en concordancia con lo postulado en las normas ISO 14.025.de referencia en este tipo de etiquetas ambientales.

El cálculo de la línea de base le permite a ACA Bio conocer su situación actual, compararse con el resto de las industrias Nacionales e Internacionales, y a partir de la misma plantearse objetivos de mejoras.

Con respecto a los contenidos energéticos de insumos que se han tomando de Biograce esto se podría ampliar y mejorarse tomando como referencia bases más amplias como el ecoinvent.



## **Agradecimientos:**

Se agradece al Ing. Santiago Acquaroli y a todo su equipo responsables en ACABIO por asistir y facilitar la información necesaria para hacer posible este trabajo.

## **Referencias bibliográficas:**

Approved consolidated baseline and monitoring methodology ACM0017 "Production of Bioethanol for use as fuel" - v.01.1 - UNFCCC - CDM Executive Board.  
<http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/WENY1VXSSZHD73WXG3RXX8KNAICCAT>

Bare, J., Pennington, D., Udo de Haes, H. (1999). Life Cycle Impact Assessment Sophistication. International Workshop. Int. Journal of LCA, Vol 4, N° 5, pag. 299-306.

Bengtsson, G., Berglund, R. (1996). Life Cycle Assessments including the Working environment. Summary of methods and case studies. Molndal: IVF Swedish Institute of Production Engineering Research. (IVF Research Publication N° 95859). Boustead, J., Hanckock, (1979). Handbook of industrial analysis.

Chum H Zhang Y; Hill J, Tiffany D; Vance M; Goss A Haq J Understanding the evolution of environmental and energy performance of the US corn ethanol industry: evaluation of selected metrics Biofuels bioproducts and biorefining Volume 8, Issue 2 March/April 2014 Pages 224–240

DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:PDF>

Erlandsson, M., Levin, P., Myhre, L. (1997). Energy and Environmental consequences of an Additional Wall Insulation of a Dwelling. Building and Environment, Vol 32, N. 2

Finnveden, G., Andersson-Skold, Y., Samuelsson, M-O, Zetterberg, L., Lindfors L-G (1992). Classification (impact analysis) in connection with life cycle assessments – a preliminary study. In Product life cycle assessment – principles and methodology. Nord1992:9. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

Flugge, M., J. Lewandrowski, J. Rosenfeld, C. Boland, T. Hendrickson, K. Jaglo, S. Kolansky, K. Moffroid, M. Riley-Gilbert, and D. Pape, 2017. A Life-Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Emissions of Corn-Based Ethanol. Report prepared by ICF under USDA Contract No. AG-3142-D-16-0243. January 30, 2017.

Gallagher, P., G. Schamel, H. Shapouri and H. Brubaker, "The International Competitiveness of the U.S. Corn-Ethanol Industry," *Agribusiness: An International Journal* 22(2006): 1-26.

Huerta; J.A. Hilbert; L. Donato - INTA Balances Energéticos de la Producción Argentina de Bioetanol con datos locales de la etapa industrial, I - IIR-BC-INF-03-09 [http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/balancesenergia\\_procproduccionBioetanol.pdf](http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/balancesenergia_procproduccionBioetanol.pdf)

Longwen O, Tristan R. Brown, Rajeeva Thilakarathne, Guiping Hu, R. Brown Techno-economic analysis of co-located corn grain and corn stover ethanol plants Biofuels bioproducts and biorefining Volume 8, Issue 3 May/June 2014 Pages 412–422

Panichelli Análisis de Ciclo de vida (ACV) de la producción de Bioetanol (B100) en Argentina — Año 2006. <http://www.inta.gov.ar/iir/info/documentos/energia/panichelli2006.pdf>

Shapouri, H; Duffield, J Wang, M The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update <http://purl.umn.edu/34075> United States Department of Agriculture, Economic Research Service in its series Agricultural Economics Reports number 34075. 2002