

Consumo de combustible y energía en el transporte de bioetanol

Marcos A. Golato* y Geronimo J. Cárdenas**

Introducción

Según estudios realizados sobre costos de producción para la República Argentina (Nardi y Todd, 2007), nuestro país posee los menores costos de producción para la mayoría de los productos agrícolas con los que tiene una importante participación en el mercado global, pero tiene mayores costos de comercialización que Brasil y los Estados Unidos de Norteamérica. En el caso de la soja, por ejemplo, los mayores costos de comercialización están dados por los costos de transporte, almacenaje y aranceles de exportación.

El mismo artículo indica que en la Argentina, el 84% de la producción agrícola es transportada por camión y el 14,5% por ferrocarril, siendo prácticamente despreciable el transporte fluvial.

Por otro lado, existe en nuestro país un régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentable de biocombustibles (Ley N° 26.093), por lo que nuestra región presenta un potencial productivo interesante para su desarrollo (Cárdenas *et al.*, 2007).

Actualmente, la producción de bioetanol combustible (alcohol anhidro) a partir de la caña de azúcar en Tucumán es de aproximadamente 116.600 m³/año, con una proyección para el 2011 de 148.500 m³/año y con incrementos productivos anuales esperables, en función de los cortes establecidos en la mencionada ley.

Debido a este incremento en la producción de bioetanol, se hace necesario realizar estudios del ciclo de vida (ACV) que permitan identificar los impactos ambientales del proceso de elaboración del bioetanol y de su transporte a los lugares de expendio, para la toma de decisiones. Estos estudios permitirán contar

con herramientas apropiadas para desarrollar en forma sustentable el proceso de industrialización de biocombustibles, operando con balances positivos en los aspectos energético, ambiental, económico y social (Cárdenas, 2007).

La energía consumida en todas las etapas de producción y transporte de un biocombustible debe ser la menor posible para que su balance energético, es decir la energía neta que deja disponible, sea mayor.

En el presente trabajo se analizan los consumos de combustible y energía por unidad de carga cada 100 kilómetros recorridos en el transporte de bioetanol por camión y tren ferroviario. Se comparan estos dos medios de transporte a fin de decidir cuál resulta más conveniente para el traslado de este combustible, desde el punto de vista energético y de su impacto ambiental. Se analiza además, la energía consumida en el transporte en relación a la energía transportada (alcohol combustible).

Análisis de los consumos de combustible

Se calculó el consumo de combustible para camión con acoplado, con motor turbocooler de 269 kW a 1900 rpm, según curva de desempeño del motor (Mercedes-Benz, 2010). Además, se consideró una carga útil máxima de 30 t (34 m³), la máxima autorizada en nuestro país.

Para el caso del tren ferroviario, se consideró una locomotora típica de circulación actual en la Argentina, con una potencia máxima de 1846 kW. La formación evaluada se encuentra compuesta por una locomotora y 30 vagones tanque de 53 t (60 m³) de carga máxima cada uno.

* Ing. Mec., Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, ** Ing. Qco., Programa Bioenergía, EEAOC.

Se tomó como hipótesis que las velocidades de los móviles era constante (aceleración = 0) y que recorrerían una distancia de 100 km por terreno llano y sin pendiente, el camión por ruta asfaltada y el tren por vías en buen estado. Se consideró además, una densidad del combustible ("diesel oil" normal) de 0,85 kg/l (850 g/l).

Con respecto a las velocidades de marcha de los vehículos, se consideró, bajo las hipótesis antes indicadas, que el tren se trasladaba a una velocidad promedio a plena carga de 40 km/h. Para el caso del camión se consideró, de acuerdo con Marchese y Golato (2011), una baja variación del consumo absoluto de combustible para velocidades entre 50 km/h y 80 km/h, por lo que se adoptó una velocidad promedio de 65 km/h, lo cual no ocasionó errores significativos.

Consumo de combustible en el tren

Para este caso, se consideró una capacidad de carga de la formación de 1590 t. Por otro lado, se adoptó como potencia efectiva de la locomotora un 75% de su valor máximo, o sea:

$$N_e = 0,75 \cdot N_{m\acute{a}x.} = 0,75 \cdot 1846 \text{ kW} = 1384,5 \text{ kW}$$

La potencia específica de transporte quedó definida por medio de la expresión (1), la que indica la potencia consumida por tonelada de carga útil transportada.

$$N_{et} = N_e / T \text{ [kW/t]} \quad (1)$$

A partir de (1), se pudo deducir el consumo específico de transporte como:

$$B_{et} = N_{et} \cdot b_e \text{ [g/t.h]} \quad (2)$$

Donde b_e es el consumo específico del motor y está dado en g/kWh. Para el caso del tren, se tomó $b_e = 227$ g/kWh, según manual de locomotora GM GT 22 CW.

Luego, a partir de (2) se pudo encontrar su equivalente en volumen, afectando la expresión con la densidad del combustible ρ_{comb} g/l., o sea:

$$B'_{et} = B_{et} / \rho_{comb.} \text{ [l/t.h]} \quad (3)$$

Y a partir de (2) y (3), se determinó el consumo específico de la carga, cada 100 km de recorrido y moviéndose a una velocidad v constante, haciendo el cálculo:

$$B = B_{et} \cdot 100 / (v \cdot \rho_{comb.}) \text{ [l/t.100 km]} \quad (4)$$

El volumen de combustible total necesario para transportar una determinada carga cada 100 km pudo determinarse a partir de (4):

$$V_{comb.} = (B \cdot T) \text{ [l/100 km]} \quad (5)$$

También, se pudo conocer el consumo horario de combustible cada 100 km, con la expresión:

$$B_h = V_{comb.} / (l / v) \text{ [l/h.100 km]} \quad (6)$$

El mismo consumo por kilómetro recorrido fue:

$$Bh' = (B_h / 100) \text{ [l/h.km]} \quad (7)$$

Consumo de combustible en el camión

Para los cálculos en el caso de transporte por camión, las expresiones antes citadas también resultaron válidas. La potencia efectiva fue:

$$N_e = 0,75 \cdot N_{m\acute{a}x.} = 0,75 \cdot 269 \text{ kW} = 201,7 \text{ kW}$$

Además, se consideró un combustible diésel normal, similar al utilizado en el tren y para el consumo específico del motor del camión se tomó el valor 192 g/kWh, según Marchese *et al.*, (2009).

Energía consumida en el transporte

A partir de la comparación de los consumos de combustibles del camión y del tren, y considerando las capacidades de carga adoptadas para ambos móviles, se pudo deducir el equivalente calórico del consumo de potencia por tonelada de carga transportada, o sea:

$$Q_{et} = N_{et} \cdot 3600 \text{ [kJ/t.h]} \quad (8)$$

A partir de (8), se puede encontrar la energía total consumida por cualquier móvil para transportar su carga útil T [t] a 100 km de distancia, moviéndose con una velocidad constante v [km/h], haciendo:

$$E_{cons.} = Q_{et} \cdot T \cdot (100 / v) \text{ [kJ]} \quad (9)$$

Para el caso del transporte de alcohol, y con la ayuda de la expresión (9), se determinó la relación entre la energía consumida en el transporte y la energía transportada. Dicha relación se denomina eficiencia del transporte y se define como:

$$\eta_{transp.} = E_{cons.} / E_{trans.} \quad (10)$$

Esta relación resulta útil en el caso de evaluar la conveniencia del transporte del producto desde el punto de vista energético. Cuanto menor sea esta relación, menor es el gasto necesario para el transporte en función del valor energético de la carga.

Con respecto a la energía transportada, esta pudo determinarse a partir de la capacidad de carga de los móviles y el poder calorífico inferior del alcohol ($PCI_{alcoh.}$), según (11).

$$E_{trans.} = T \cdot PCI_{alcoh.} \text{ [kJ]} \quad (11)$$

Para este análisis, se adoptó una densidad para el alcohol transportado de $\rho_{\text{alcoh.}} = 0,794 \text{ kg/litros}$ y un poder calorífico de $\text{PCI}_{\text{alcoh.}} = 26.740 \text{ kJ/kg}$.

Se recuerda que la capacidad de carga de alcohol (V_T) es de 34.000 l para el camión y de 60.000 l por cada vagón del tren. Esto es equivalente a 26.996 kg y a 47.640 kg, respectivamente.

Comparación de los consumos de combustible y energía

La Tabla 1 consiste en un cuadro comparativo de los consumos de combustible para el tren y para el camión. Se observa que el camión consumió mayor potencia por tonelada de carga transportada que el tren (6,72 contra 0,87 kW/t). Esto se manifestó directamente en el consumo horario de combustible por tonelada de carga, el que para el caso del camión resulta 6,53 veces superior al del tren. Ahora, si se considera el consumo de combustible por tonelada de carga transportada por cada 100 km recorridos, se puede ver que el consumo del camión fue aproximadamente cuatro veces superior al del tren (2,33 contra 0,58 l/t.100 km).

Cabe destacar que si se analizan los consumos horarios por kilómetro recorrido de ambos móviles, parecería superior el consumo del tren frente al del camión, en una relación aproximada de 8 a 1 (de 0,45 a 3,69 l/h.km), pero con una capaci-

dad de carga muy distinta. Para el caso del camión, el consumo establecido de 0,45 l/h.km fue el necesario para transportar 30 t de carga, mientras que para el caso del tren, el consumo establecido de 3,69 l/h.km fue el requerido para transportar 1590 t, o sea, con una capacidad de carga 53 veces superior a la del camión.

Además, debe considerarse el hecho de que la marcha relativamente constante del tren durante su trayecto, frente a las aceleraciones y desaceleraciones del camión, trae mejores rendimientos en los consumos de combustible, debido principalmente a la menor potencia consumida por unidad de carga transportada. Por otro lado, debido a estas aceleraciones y desaceleraciones en la marcha del vehículo, se producen picos en las emisiones de monóxido de carbono.

Otro factor importante que influye directamente en el consumo de combustible del camión es el estado del pavimento, el rápido desgaste de sus cubiertas y su presión de inflado.

En la Tabla 2, pueden observarse los resultados del análisis de los consumos de energía en tren y en camión para el transporte de alcohol. Para este análisis, se consideró una carga equivalente (T_{eq}) para los móviles mencionados, que tuvo en cuenta las correspondientes capacidades máximas de transporte y la densidad del alcohol.

Tabla 1. Comparación de consumos de combustible entre el tren y el camión.

Parámetros	Tren	Camión
Potencia máxima a plena carga del motor de tracción: $N_{\text{máx.}}$ [kW]	1.846,00	269,00
Potencia efectiva desarrollada por el motor de tracción: N_e [kW]	1.384,50	201,70
Carga máxima transportada: T [t]	1.590,00	30,00
Potencia específica de transporte: N_{et} [kW/t]	0,87	6,72
Consumo específico del motor: b_e [g/kW.h]	227,00	192,00
Consumo específico de transporte (máscico): B_{et} [g/t.h]	197,60	1290,80
Consumo específico de transporte (volumétrico): B'_{et} [l/t.h]	0,23	1,52
Consumo específico de la carga cada 100 km: B [l/t.100 km]	0,58	2,33
Volumen total de combustible cada 100 km: $V_{\text{comb.}}$ [l/100 km]	924,10	70,09
Consumo horario de combustible cada 100 km: B_h [l/h.100 km]	369,60	45,55
Consumo horario de combustible por km: B_h' [l/h.km]	3,69	0,45

Tabla 2. Resultados de los consumos de energía para el transporte de alcohol por tren y camión.

Parámetros	Tren	Camión
Carga máxima transportada de alcohol: T_{eq} [t]	1.429,200	26,900
Potencia específica de transporte: N_{et} [kW/t]	0,960	7,470
Equivalente calórico de la potencia específica: Q_{et} [kJ/t.h]	3487,400	26897,300
Energía total consumida en el transporte: $E_{\text{cons.}}$ [kJ]	12460500	1116859,400
Energía total transportada: $E_{\text{trans.}}$ [kJ]	$3,82 \times 10^{10}$	721873040
Eficiencia del transporte: $\eta_{\text{transp.}}$ [%]	0,032	0,155

Tabla 3. Comparación de la emisión de CO₂ para el transporte por tren y por camión.

Tipo de transporte	Tren	Camión
kg CO ₂ /100 km	2508	189,97
kg CO ₂ / t.100 km	1,57	6,32

En la Tabla 2, puede verse que la energía consumida por tonelada de carga en el transporte por camión fue aproximadamente ocho veces superior a la consumida por el ferrocarril, (7,470 contra 0,960 kw/t).

Impacto ambiental del transporte

En la Tabla 3, se expone una comparación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por kilómetro recorrido y por tonelada transportada, para los casos analizados de transporte de carga por camión y por tren. Estos resultados se obtuvieron a partir del cálculo del factor de emisión, que representa la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera por litro de combustible utilizado. En este estudio se ha determinado un factor de emisión de 2,714 kgCO₂/l gasoil, a partir de la composición elemental de carbono contenido en el combustible (0,87 kg C/ kg gasoil) y considerando que todo este carbono se transforma en CO₂. Este resultado coincide aproximadamente con el indicado por la Generalitat de Catalunya (GENCAT, 2010), que es 2,610 kg CO₂/l gasoil.

Para el caso del transporte ferroviario, la emisión de CO₂ cada 100 km recorridos representaría a simple vista 13,2 veces más que para el caso del camión. Pero considerando la emisión de CO₂ por tonelada de carga transportada cada 100 km, vemos que cuando se utiliza el tren, la emisión resulta aproximadamente cuatro veces menor que cuando se utiliza un camión.

Consideraciones finales

Considerando una carga transportada de 30.000 l de alcohol en un camión cisterna de 269 kW (360 HP) de potencia, moviéndose a 65 km/h en un trayecto de 100 km, se dedujo que la energía consumida por el móvil en relación a la energía transportada representa un 0,155% de esta última.

En el caso del tren, con una capacidad de carga de 0,96 kW/t y considerando una formación de 30 vagones tanque de 60.000 l/vagón, el consumo de energía para el transporte representa un 0,032% de la carga energética total transportada, si el móvil se desplaza a 40 km/h a lo largo de 100 km.

Este análisis nos lleva a deducir que el tren consume 4,68 veces menos energía que un camión, en relación a la energía transportada bajo las condiciones establecidas, además de llevar sesenta veces su carga (1.800.000 l contra 30.000 l).

Por otro lado, se determinó que el transporte de carga ferroviario posee un menor impacto ambiental que el camión de carga por tonelada de carga transportada cada 100 km, en una relación 1 a 4 (1,57 contra 6,32 kg CO₂/ t.100 km).

Es importante destacar que el transporte de carga ferroviario no escapa actualmente a la competencia que supone el transporte por camión, debido fundamentalmente a su rapidez y frecuencia. Para el caso del tren, se necesita un volumen grande de productos, por lo que solamente muestra su poder competitivo cuando se dispone de carga suficiente en volumen y frecuencia, y cuando no se realizan paradas hasta su destino.

En países desarrollados se utiliza una solución combinada denominada transporte polimodal, donde existen terminales para el trasbordo de los contenedores de carga del tren a camiones y viceversa, volviendo al sistema de transporte más ágil y competitivo.

Bibliografía citada

- Cárdenas, J. G. 2007.** Algunas condiciones para un proyecto de producción de biocombustibles. *Avance Agroind.* 28 (1): 6-8.
- Cárdenas, J.; O. Diez y E. Quaia. 2007.** Bioetanol: un combustible con posibilidades productivas en Tucumán. *Avance Agroind.* 28 (1): 9-11.
- Generalitat de Catalunya (GENCAT). 2010.** Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. [En línea]. Disponible en <http://www20.gencat.cat/portal/site/canviclimatic> (consultado 15 diciembre 2010). Oficina Catalana del Canvi Climàtic. Generalitat de Catalunya.
- Marchese, R.; M. Budeguer; M. Golato y J. López. 2009.** Variaciones en la potencia de los motores diesel según algunas características del combustible utilizado. En: *Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, 5, Salta, R. Argentina*, pp. 309-316.
- Marchese, R. y M. Golato. 2011.** El consumo de combustible y energía en el transporte. *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, UNT, 20 (33): 35-42.*
- Mercedes-Benz. 2010.** Catálogo de camión Extra-Pesado L1634/51. [En línea]. Disponible en http://www.automotoresmega.com.ar/imagenes-mega/vehiculos_1_1634.pdf (consultado 12 agosto 2010).
- Nardi, M. G. y D. D. Todd. 2007.** Estimación de la capacidad del transporte ferroviario e hidroviario de granos y subproductos en la Argentina. [En línea]. Disponible en http://www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/trabajos_pdf/T3.pdf (consultado 10 julio 2010). Department of Applied Economics and Statistics, Clemson University. Carolina del Sur, USA.