

Factibilidad Económica de la Producción de Etanol a través del Rastrojo de Maíz y Sorgo mediante la aplicación de un modelo matemático.

Luis Alberto Orlandi, Mgtr. Ing.*, Irma Noemi No, Mgtr. Lic., Adalberto Mario Ascurra, Mgtr. Ing.

*Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina
Ruta 4 (ex-Camino de cintura) – Km. 2, Lomas de Zamora, Buenos Aires (1832)
lorlandi@ingenieria.unlz.edu.ar, ino@ingenieria.unlz.edu.ar, mascorra@gmail.com*

RESUMEN.

Los biocombustibles constituyen una de las fuentes más significativas de las energías renovables para las que Argentina posee ventajas comparativas importantes considerando autoabastecimiento y exportación a países industriales con necesidad de mejorar su balance energético, siendo las condiciones de este país adecuadas para desarrollar insumos básicos necesarios para la producción de energía a partir de biomasa. El Bioetanol es un bio-sustituto de los combustibles convencionales, actualmente se obtiene por un proceso de fermentación alcohólica de la caña de azúcar y por hidrolización con una posterior fermentación del almidón del maíz siendo esta una materia prima que resta recursos a la industria alimentaria. Teniendo en cuenta esto, se plantea la posibilidad de producir etanol con materia prima que se desecha, generando la obtención de energía sustentable y renovable favoreciendo el cuidado del medio ambiente.

Para esta actividad, se determinó por medio de un modelo matemático (Riggs,1999) la factibilidad económica de la producción de etanol a través del rastrojo de maíz y sorgo, utilizando procesos tecnológicos, teniendo en cuenta datos significativos e índices económicos agroindustriales reales de la cantidad de rastrojo disponible en Argentina por región y zona de siembra.

Palabras Claves:

Biocombustibles; Bioetanol lignocelulósico; Producción de Bioetanol; Energías sustentables; Método de Riggs

ABSTRACT

Biofuels are one of the most significant sources of renewable energy for which Argentina has significant comparative advantages, considering self-sufficiency, and export to industrial countries in need of improving its energy balance, being the conditions in this country adequate to develop basic inputs necessary for the production of energy from biomass. Bioethanol is a bio-substitute for conventional fuels, it is currently obtained by an alcoholic fermentation process of sugar cane, and by hydrolyzing, with a subsequent fermentation of corn starch, being this, a raw material that reduces resources to the food industry. Taking this into account, the possibility of producing ethanol is raised, with raw material that is discarded, generating the obtaining of sustainable and renewable energy, favoring the care of the environment.

For this activity, the economic feasibility of ethanol production through maize and sorghum stubble, through technological processes, was determined by means of a mathematical model (Riggs, 1999), taking into account significant data and agricultural economic indices. industrial, with real data on the amount of stubble available in Argentina by region and planting area.

1. INTRODUCCIÓN.

La presente publicación se enfoca en el análisis de factibilidad económica de la producción de bioetanol lignocelulósico a partir de una fuente como el rastrojo de maíz y de sorgo, destacando que con esta cualidad, no se resta recursos a la industria alimentaria, por el contrario, se obtendría una fuente energética sustentable y renovable, este tipo de biomasa genera contenido energético a partir de la fotosíntesis, y de este modo se estaría consumiendo energía solar a través de este mecanismo biológico.

En primer lugar, cabe destacar ~~es~~ que se trata de una materia prima que no resta recursos a la industria alimentaria. Por el contrario, el material lignocelulósico podría aportar numerosas ventajas en la obtención de una fuente energética sustentable y renovable.

En segundo lugar, esta propiedad tan importante, la sustentabilidad, proviene del hecho que este tipo de biomasa genera su contenido energético -como todos los vegetales- a partir de la fotosíntesis, lo que implica, en última instancia, consumir energía solar fijada por este mecanismo biológico.

La tercera cuestión es que los costos unitarios de las diversas fuentes de materia prima están todavía en evolución sobre la base de innovaciones tecnológicas. Hasta fechas muy recientes, la caña de azúcar ha sido la fuente más barata en la obtención de bioetanol. Sin embargo, algunos cambios tecnológicos son dignos de analizarse para verificar si hay modificaciones en las alternativas de fuentes de biomasa más económicas.

Por ello, nuestro foco de estudio está dado tanto en la descripción de los procesos tecnológicos, como en los costos resultantes de los mismos, centrándonos en la biomasa proveniente de rastrojos de maíz y, casualmente, de sorgo.

1.1. Definición del Problema y Objetivo del Trabajo.

Las energías alternativas son una solución eficiente al constante incremento de la demanda energética a nivel mundial, en el caso del bioetanol tradicional obtenido por ejemplo del maíz o de la caña de azúcar, compite directamente con productos alimenticios, nuestra propuesta es partir de una materia prima como el rastrojo de maíz o sorgo que se considera un desecho no compitiendo de ninguna manera con la alimentación.

La finalidad es determinar por medio de un modelo matemático la viabilidad económica del proceso de obtención del bioetanol lignocelulósico

1.2. Bioetanol Lignocelulósico.

Desde el año 2005 hasta la actualidad la demanda energética en la argentina se encuentra en un constante aumento que oscila en un 10% anual, generando una imperiosa necesidad de incrementar y diversificar la matriz energética y por consiguiente no depender solamente de combustibles fósiles como el petróleo.

La obtención de combustibles fósiles, por el momento pueden incrementar su producción en base a nuevas tecnologías en exploración y refinación como así también en el hallazgo de yacimientos de petróleo no convencionales.

En los últimos años la argentina se ve necesitada de importar petróleo y sus derivados ya que no puede satisfacer la demanda, en ese escenario la opción de los combustibles no convencionales son una solución posible para logra un balance en la matriz energética nacional.

El bioetanol es un biosustituto de los combustibles convencionales, se obtiene de la fermentación alcohólica de la caña de azúcar, en la actualidad y por ley, los combustibles como las naftas tienen un porcentaje de etanol en su formulación, generando un ahorro de combustibles fósiles y preservando el medio ambiente, evitando que se produzcan parcialmente gases de efecto invernadero que generan el calentamiento global.

La Ley 26.093 define como " biocombustibles" al bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación.

Debido a la gran superficie cultivable de la argentina las plantas productoras de bioetanol se encuentran fuera de los centros urbanos más poblados generando la descentralización y empleo donde más se los necesita, impulsando asimismo el desarrollo de zonas del interior del país.

En cuanto al origen del bioetanol se distinguen dos procedimientos: los que utilizan como materia prima cultivos alimenticios tales como el maíz, trigo, sorgo y cebada, se los denomina de primera generación y compiten directamente con los alimentos, en cuanto a los de segunda generación son aquellos que se obtienen a partir de residuos forestales o residuos de procesos agroindustriales, básicamente se trata de una materia prima que no resta recursos a la industria alimentaria. Por el contrario, el material lignocelulósico podría aportar numerosas ventajas en la obtención de una fuente energética sustentable y renovable. [1]

1.3. Proceso Industrial.

Se describen brevemente las etapas que componen el proceso industrial de producción de bioetanol.

1.3.1. Molienda.

Hay dos tipos de molienda, en seco y mojada. Durante el proceso de molienda en mojado, el grano está separado en sus componentes, el almidón se convierte en etanol y los componentes restantes o subproductos se venden; durante el proceso de molienda en seco, los granos no están fraccionados y todos sus nutrientes entran en el proceso y se concentran en un subproducto de la destilación utilizado para el alimento animal.

1.3.2. Pretratamiento.

Los pretratamientos tienen por objetivo romper la matriz de lignina presente en el material, para dejar expuestos los distintos polisacáridos para que sean reducidos a azúcares fermentables a través de hidrólisis enzimática.

1.3.3. Detoxificación.

Durante los procesos de pretratamientos e hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, se generan una gran cantidad de compuestos que pueden inhibir el proceso. Por esta razón y dependiendo del tipo de pretratamiento pueden emplearse los métodos de detoxificación, que pueden ser físicos, químicos o biológicos.

1.3.4. Hidrólisis.

Los polímeros de carbohidrato presentes en los materiales lignocelulósicos necesitan ser convertidos a azúcares simples antes de la fermentación, a través de un proceso llamado hidrólisis. Se clasifica en hidrólisis química y enzimática.

1.3.5. Fermentación.

El hidrolizado del material lignocelulósico no solo contiene glucosa que es el primer producto de fermentación, sino también contiene varios monosacáridos como la xilosa, manosa, galactosa, arabinosa y oligosacáridos que igualmente deben ser fermentados por microorganismos para una eficaz producción de bioetanol.

1.3.6. Destilación.

Tanto la hidrólisis como la fermentación de la biomasa originan subproductos, y se han desarrollado tecnologías para su recuperación. En el caso en que los productos de fermentación son más volátiles que el agua su recuperación se hace generalmente por destilación. Un proceso de destilación separa el bioetanol de la mezcla líquida con el agua, por lo tanto, el primer paso es recuperar el bioetanol en una columna de destilación, donde la mayoría de los remanentes de agua y partes sólidas son removidos, el producto (37% bioetanol) se concentra en una columna, aquí los procesos se llevan a cabo con un excesivo cuidado para reducir las pérdidas en un 99.6%. Después del primer paso, los sólidos son separados usando una centrífuga y una secadora rotativa, una parte de los sólidos recuperados (25%) son fermentados nuevamente y el resto se evapora, aunque gran parte de lo evaporado se recupera nuevamente. [2]

2. METODOLOGIA.

La metodología utilizada se funda en el estudio de un caso que se basa en datos significativos e índices económicos de tipo agroindustriales, que fueron aportados por la Facultad de Ciencias Agrarias perteneciente a la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, con datos fácticos referentes a la cantidad de rastrojo disponible en nuestro país, por región y zona donde se siembra el mismo. Estos datos fueron alcanzados por la existencia de bases de datos del laboratorio NIRS (Espectroscopía de Infrarrojo Cercano), en conjunto con indicadores de costos industriales agropecuarios provenientes de bibliografía específica, y de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la República Argentina [3], junto con la Confederación Argentina de Transporte de Cargas, ajustados temporalmente y por orden de magnitud, con objetivo de determinación de costos de producir bioetanol a través de rastrojo del maíz y sorgo [4].

Asimismo, se aplica un modelo matemático que permita determinar la viabilidad económica de obtener bioetanol por medio de esta metodología [5], para así obtener fórmulas y ecuaciones aceptables en función de analizar la realidad y predecir precios, costos y utilidades.

2.1. Análisis explicativo fórmula de Riggs.

Dada la Ecuación (1):

$$P = X - y.N \quad (1)$$

Siendo:

- P Precio del producto luego de la fabricación (\$)
- X Precio del mercado antes de la fabricación (\$)
- Y Variable del tipo de mercado
- N Número de productos a fabricar (u, Kg, m³, etc.)

Si "N" aumenta, el precio del producto disminuye hasta adoptar el valor cero (ideal), y N se transforma en NP, denominándose mercado potencial (ver Ecuación (2)).

$$0 = X - y.N_p \quad (2)$$

El mercado potencial, es un dato estadístico que proviene de un estudio de marketing, una consultora o bien de la experiencia. Esto nos permite calcular la variable del tipo de mercado, expresada en la fórmula (3).

$$y = X / N_p \quad (3)$$

Si se asignan valores de demanda, y precios, se detecta que el modelo se puede adaptar a una economía de escala, donde al aumentar la demanda, los costos disminuyen, pero esto posee un límite.

El modelo se adapta a una economía de escala, si se aumenta la producción, los costos disminuyen, pero con un cierto límite, como se mencionó anteriormente.

Luego, combinando este método con las fórmulas de economía clásica presentado en el sistema (4)

$$\begin{cases} U = V - C \\ C = F + v.N \\ V = P.N \end{cases} \quad (4)$$

Siendo: U (utilidad), V (ventas), v (costo variable unitario), F (costos fijos), N (cantidad de producto), C (costo total).

Se logra obtener cual es la cantidad óptima por producir expresada en la Ecuación (5):

$$N_{\acute{o}p} = (X - v) / 2.y \quad (5)$$

Así se determina la cantidad de bioetanol que conviene obtener para alcanzar la máxima utilidad [5][1].

Se propone en el caso estudiado valores de F, v, X, V, P, Nmáx (mencionada como Nóp en la fórmula 5) y Np, confeccionando una planilla de cálculo (Tabla 1), a fin de simular escalas de producción diversas, para obtener la cantidad óptima de producto a fabricar, generando a su vez, la máxima utilidad, tratándose del objetivo principal de toda empresa.

Tabla 1 Punto de Equilibrio y Utilidades.

X	v	y	P	F	$N_{m\acute{a}x}$	N_p
100	60	0,001	80	300000	20000	100000
N	F	$v.N$	$F+v.N$	U	V	P
0	300000	0	300000	-300000	0	100
19000	300000	1140000	1440000	99000	1539000	81
19900	300000	1194000	1494000	99990	1593990	80,1
20000	300000	1200000	1500000	100000	1600000	80
20100	300000	1206000	1506000	99990	1605990	79,9
21000	300000	1260000	1560000	99000	1659000	79

Divisando en este caso que la cantidad óptima a producir es de 20.000 unidades, a un precio de \$80, se puede confeccionar un gráfico con un diagrama de punto de equilibrio (Figura 1).

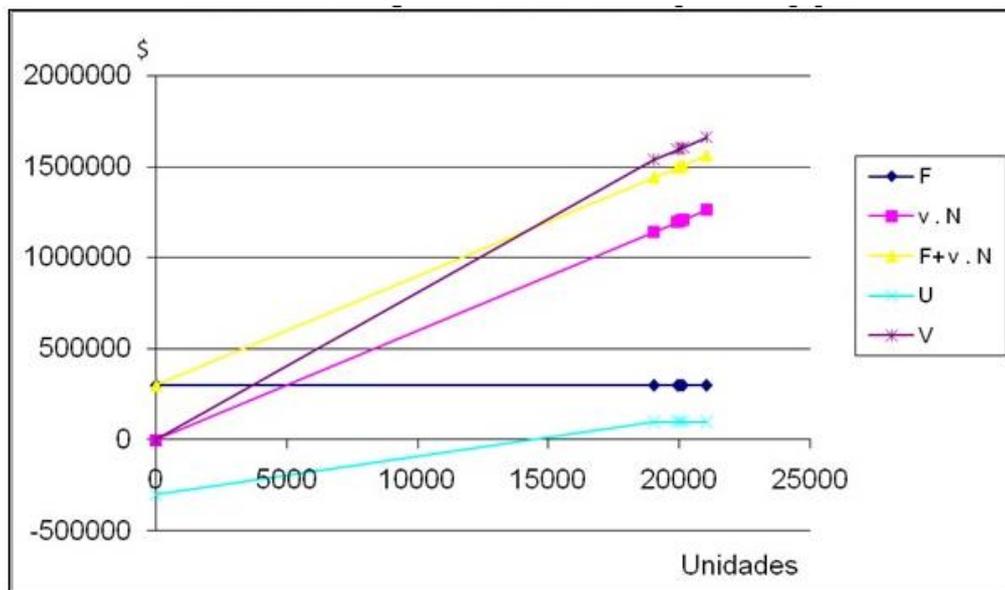


Figura 1 Diagrama de Punto de Equilibrio.

En la Figura 1 se puede observar que la curva de Utilidad, corta al eje de N (unidades) en 15.000, siendo este el punto de equilibrio, ya que la utilidad es \$0, siendo este un punto muy importante para el proceso, por tratarse de la cantidad mínima a producir para no tener pérdidas.

Para este caso (bioetanol) es conocido el precio del mercado "X" con detalle, por ende, si luego de realizar el análisis de factibilidad, se llegase a un precio "P" inferior, estaríamos en condiciones de afirmar, al menos de modo preliminar, la viabilidad del proceso de obtención del producto a través del método lignocelulósico [1].

2.2. Análisis de Datos.

Se fijan una serie de parámetros y escenarios [1] para lograr calcular los diversos costos involucrados en la producción de bioetanol, con las condiciones que existen en la Argentina, en base a datos oficiales [3].

2.2.1. Escenario 1.

Se consideran los siguientes parámetros:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 100km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 6639,7 \$/T
- Costos fijos estimados: 3000000\$
- Mercado potencial de bioetanol: 360000 T

En la Tabla 2 y en la Figura 2 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 1.

Tabla 2 Análisis de Utilidades del Escenario 1.

X	v	y	P	F	N_{máx}	N_p
11990	6640	0,0333	9315	3000000	80316,93	360000
N	F	v.N	F+v.N	U	V	P
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
79316,93	3000000	526664420	529664420	211814484	741478905	9348,30
80216,93	3000000	532640420	535640420	211847457	747487877	9318,33
80316,93	3000000	533304420	536304420	211847790	748152210	9315
80416,93	3000000	533968420	536968420	211847457	748815877	9311,65
80316,93	3000000	539944420	542944420	211814484	754758905	9281,69

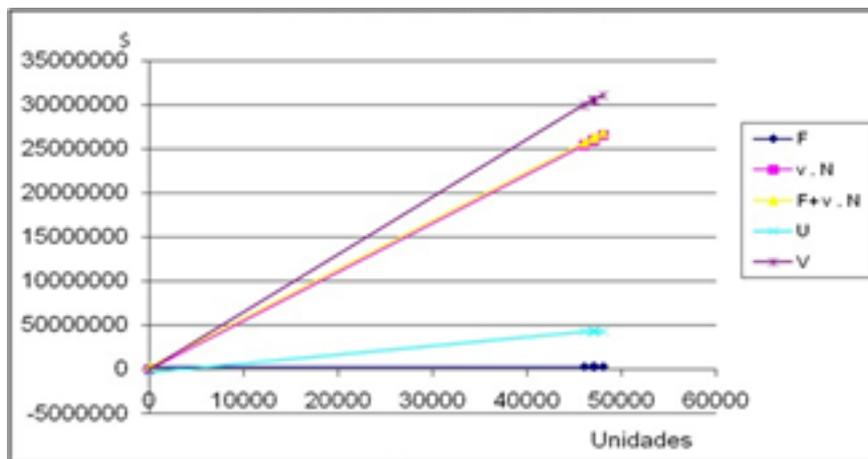


Figura 2 Análisis de utilidades del escenario 1.

2.2.2. Escenario 2.

Se consideran los siguientes parámetros:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 300km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 6892,7 \$/T (incrementa por costo de transporte)
- Costos fijos estimados: 3000000\$
- Mercado potencial de bioetanol: 360000 T

En la Tabla 3 y en la Figura 3 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 2.

Tabla 3 Análisis de Utilidades del Escenario 2.

<i>X</i>	<i>v</i>	<i>y</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>N_{máx}</i>	<i>N_p</i>
11990	6893	0,0333	9441,5	3000000	76518,76	360000
<i>N</i>	<i>F</i>	<i>v.N</i>	<i>F+v.N</i>	<i>U</i>	<i>V</i>	<i>P</i>
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
75518,76	3000000	520550852	523550852	191974769	715525620	9474,80
76418,76	3000000	526754552	529754552	192007741	721762293	9444,83
76518,76	3000000	527443852	530443852	192008074	722451926	9441,5
76618,76	3000000	528133152	531133152	192007741	723140893	9438,17
77518,76	3000000	534336852	537336852	191974769	729311620	9408,19

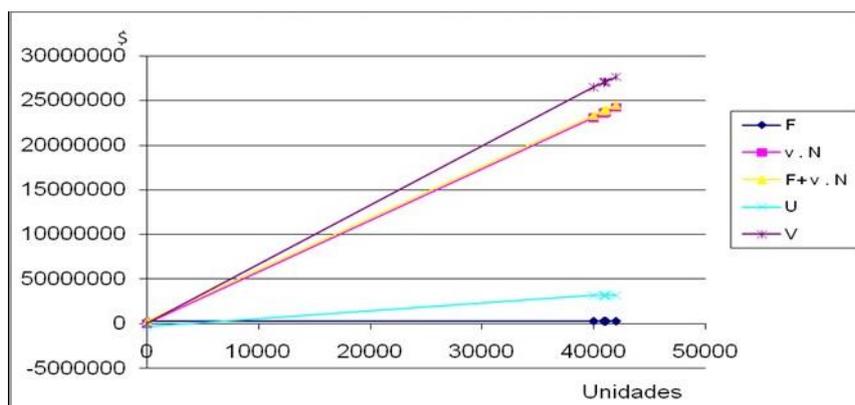


Figura 3 Análisis de utilidades del escenario 2.

2.2.3. Escenario 3.

Se consideran los siguientes parámetros:

- Distancia máxima de transporte no supera un radio de 500 km.
- Precio de producto en el mercado: 11989,86 \$/T
- Costos variables: 7024,7 \$/T (incrementa por costo de transporte).
- Costos fijos estimados: 3000000\$
- Mercado potencial de bioetanol: 360000T

En la Tabla 4 y en la Figura 4 pueden observarse los detalles de los cálculos correspondientes al escenario 3.

Tabla 4 Análisis de Utilidades del Escenario 3.

X	v	y	P	F	$N_{\text{máx}}$	N_p
11990	7025	0,0333	9507,5	3000000	74537,11	360000
N	F	$v.N$	$F+v.N$	U	V	P
0	3000000	0	3000000	-3000000	0	11990
73537,11	3000000	516598228	519598228	182005081	701603308	9540,80
74437,11	3000000	522920728	525920728	182038053	707958781	9510,83
74537,11	3000000	523623228	526623228	182038386	708661614	9507,5
74637,11	3000000	524325728	527325728	182038053	709363781	9504,17
75537,11	3000000	530648228	533648228	182005081	715653308	9474,19

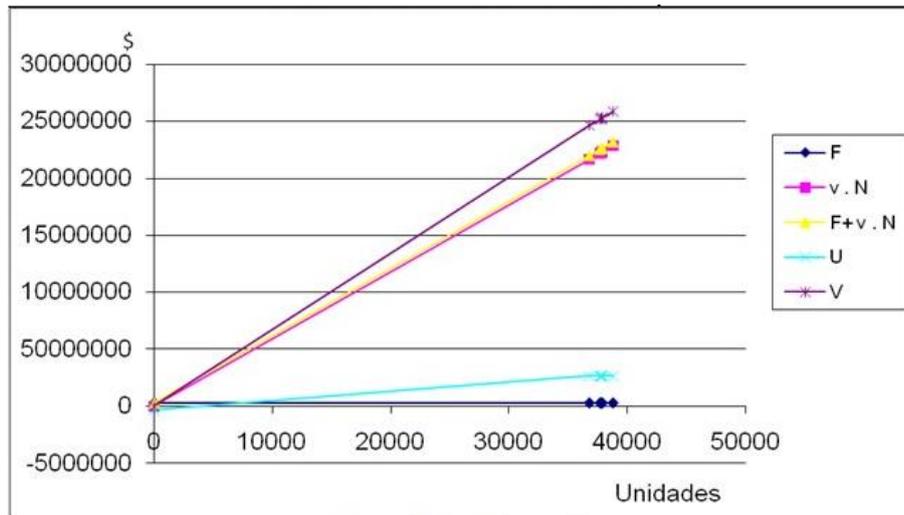


Figura 4 Análisis de utilidades del escenario 3.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se analizan y sintetizan los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones / escenarios.

Escenario 1:

Puede observarse que, luego de la fabricación del bioetanol por este método y en el escenario 1, se tiene un precio $P = 9315\$/T$ contra el precio del mercado de $X = 11990\$/T$ resultando competitivo por una diferencia de $2675\$/T$.

Se genera una utilidad "U" de $\$211.847.790$ para una producción "N" de $80317 T$ de bioetanol.

Todos estos datos pueden leerse resumidos en la Tabla 5.

Tabla 5 Resumen del Escenario 1.

Escenario	$P(\$/T)$	$X(\$/T)$	$X-P(\$/T)$	$U(\$)$	$N(T)$
1	9315	11990	2675	211847,790	80317

Escenario 2:

En este caso, al aumentar la distancia de transporte a 300Km los valores obtenidos se pueden resumir en la Tabla 6.

Tabla 6 Resumen del Escenario 2.

Escenario	$P(\$/T)$	$X(\$/T)$	$X-P(\$/T)$	$U(\$)$	$N(T)$
2	9441	11990	2549	192008,074	76519

Escenario 3:

En el último caso de análisis, al aumentar la distancia de transporte a 500Km se obtienen los valores resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7 Resumen del Escenario 3.

Escenario	$P(\$/T)$	$X(\$/T)$	$X-P(\$/T)$	$U(\$)$	$N(T)$
3	9507	11990	2483	182038,386	74537

Posteriormente al análisis de los datos otorgados por las tablas de cada escenario, se percibe que existe una tendencia, en la que al aumentar la distancia de transporte de la materia prima hasta el punto de producción, se produce una disminución en la utilidad, con reducción en la factibilidad de obtener bioetanol a través del proceso lignocelulósico, ya que aumenta el precio, y es por ello que un proceso fundamental para aplicar este método, incluiría el no dejar de lado la localización de la planta industrial, ya que en materias primas de poco peso específico, y costo, la zona núcleo de ubicación de la empresa será cercana al lugar de donde provienen estas mismas.

4. CONCLUSIONES

El carácter condicionante de los costos del transporte de la materia prima hace que la ubicación de la planta para la producción del bioetanol lignocelulósico, tenga un impacto fuerte en la factibilidad económica. En este caso particular, la localización geográfica permite el desarrollo agroindustrial en pequeñas comunidades lugareñas, evitando la concentración económica en un solo punto del país, lo que trae desequilibrios regionales y un desaprovechamiento del territorio de la República Argentina, aunque en la misma existe una asignatura pendiente referida a la mejora de las tecnologías e infraestructuras del transporte.

Frente a un análisis presentado en esta publicación, se permite determinar que la ubicación de la planta industrial se debería encontrar en un radio entre 100 y 300 km del punto específico de mayor siembra de maíz, siendo ésta la mejor alternativa analizada desde el punto de vista geoeconómico. En términos generales podemos afirmar que los cálculos realizados confirman la hipótesis planteada en base al modelo matemático elegido con las variables significativas seleccionadas. Dicho modelo nos permite predecir que existe la Factibilidad Económica de la Producción de Bioetanol Lignocelulósico a través del Rastrojo de Maíz.

El bioetanol lignocelulósico tiene una ventaja significativa que es muy importante ya que la materia prima para su obtención, no compite con los agroalimentos que son escasos y forman parte de una de las más grandes preocupaciones a nivel de nuestro país y del mundo.

Finalmente, respecto del objetivo general que se persigue, que es analizar un proceso alternativo de obtención de energía renovable para mejorar el nivel de vida de la población en forma sustentable, sumando valor agregado a nuestros productos, haciéndolos más competitivos y brindando la oportunidad de trabajo que dignifique a los trabajadores y las economías regionales de nuestro país, se ha podido demostrar que, al menos en términos económicos, el proceso alternativo basado en rastrojos de maíz es viable para la producción de bioetanol.

5. REFERENCIAS.

- [1] Orlandi, L. A. (2017). *Análisis de factibilidad económica de la producción de bioetanol lignocelulósico a partir de una fuente como el rastrojo de maíz y, eventualmente, de sorgo*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNLZ. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6525>.
- [2] Sun, Y., Cheng, J. (2002). "Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review". *Bioresource Technology* 83, pp 1–11. Elsevier. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=274FE9DE1289596A2AB52E9AB41B4241?doi=10.1.1.470.3174&rep=rep1&type=pdf>
- [3] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset? tags_limit=0
- [4] Perry R. H., Green D. W. (2003). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Ed. McGraw-Hill.
- [5] Riggs, J. (1999) *Sistemas de Producción: Planeación Análisis y Control*. Ed. Limusa Wiley. México.

Agradecimientos

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, a través de su Decano Dr. Ing. Oscar Manuel Pascal, al Doctor Ingeniero Antonio Arciénaga Morales, Director de Tesis y al Doctor Ingeniero Luis Bertoia Director del Laboratorio NIRS (Espectroscopía de Infrarrojo Cercano) de la Facultad de Ciencias Agrarias perteneciente a la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, por su buena predisposición, aportes y sugerencias para la elaboración de este trabajo como así también al alumno becario EVC-CIN Sr. Cristian Martín Michalczuk, por su colaboración en el uso de software específico.