



**IPNI**  
INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

INSTITUTO INTERNACIONAL  
DE NUTRICIÓN DE PLANTAS

WWW.IPNI.NET

PROGRAMA LATINOAMERICA - CONO SUR



MARZO  
2008

## CONTENIDO

- ❧ BIOCOMBUSTIBLES, SEGURIDAD ALIMENTARIA E INTENSIFICACIÓN ECOLÓGICA
- ❧ MATERIA ORGÁNICA Y BALANCE DE CARBONO
- ❧ FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN *DIGITARIA*
- ❧ MUESTREO DE SUELOS
- ❧ ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN EN MAÍZ

**ARCHIVO AGRONÓMICO # 12**  
REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES  
II. HORTALIZAS, FRUTALES Y FORRAJERAS

## BIOCOMBUSTIBLES, SEGURIDAD ALIMENTARIA E INTENSIFICACIÓN ECOLÓGICA DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

Kenneth G. Cassman

Director del Centro de Investigación en Ciencias Energéticas, y  
Heuermann Profesor de Agronomía, Universidad de Nebraska, Lincoln, EE.UU.  
kcassman1@unl.edu

Presentado en el XV Congreso de AAPRESID 2007, Rosario, Argentina, 14-17 Agosto.

### Introducción

En la actualidad, la agricultura está atravesando una revolución de biocombustibles, que ninguno podría haber predicho hace dos años atrás. El rápido crecimiento económico en los países más poblados a nivel mundial, la inestabilidad política en regiones con grandes reservas de petróleo, y los huracanes que dañaron gran parte de la infraestructura de producción y refinamiento de petróleo de los EE.UU. fueron causas combinadas que determinaron un abrupto incremento en los precios de la energía basada en el combustible fósil.

En respuesta, el Congreso de EE.UU. dictó en el año 2005 la ley de "Seguridad Energética" que incrementará la producción anual de biocombustibles a una capacidad de producción de alrededor de 30 billones de litros para el año 2012 y, provee de un generoso incentivo en impuestos a la industria del etanol. A nivel local, los estados y las comunidades

rurales están también proveyendo incentivos para la atracción de inversiones en nuevas plantas de biocombustibles- especialmente en el cinturón maicero



Cultivo de maíz en ensayo de sistemas de fertilización de la EEA INTA Parana. Febrero 2006.



Director: Dr. Fernando O. García

INSTITUTO INTERNACIONAL DE NUTRICIÓN DE PLANTAS  
PROGRAMA LATINOAMERICA - CONO SUR

Av. Santa Fe 910

(B1641ABO) Acassuso – Argentina

Tel/Fax (54) (011) 4798-9939

E-mail: fgarcia@ipni.net

Sitio Web: [www.ipni.net](http://www.ipni.net)



Propietario: Potash and Phosphate  
Institute of Canada (PPIC)

ISSN 1666 - 7115

No. de Registro de Propiedad Intelectual 222581

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se cite la fuente y el autor.

Diseño e Impresión: [www.agroeditorial.com.ar](http://www.agroeditorial.com.ar)  
[amatthiess@amatthiess.com.ar](mailto:amatthiess@amatthiess.com.ar)

## Contenido:

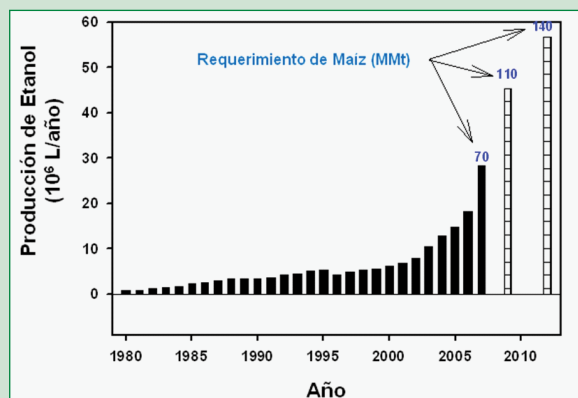
Biocombustibles, seguridad alimentaria e intensificación ecológica de los sistemas agrícolas	1
Compartimentos de la materia orgánica y balance de carbono en experimentos sobre sistemas de manejo de suelos de larga duración	9
Efecto de la fertilización nitrogenada en digitaria ( <i>Digitaria eriantha</i> Steudel)	12
¿Cuántas submuestras de suelo hay que tomar para caracterizar la fertilidad de un lote en la Pampa Ondulada?	17
Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz y el balance de nutrientes en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Campaña 2006/07	20
Publicaciones de IPNI	23
Congresos, Cursos y Simposios	24

## Archivo Agronómico N° 12:

**Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios**

de los EE.UU. En adición a estos incentivos, el elevado precio de la gasolina derivada de petróleo hace a la producción de etanol, a partir del grano de maíz (llamado maíz-etanol), altamente beneficioso, lo cual ayuda también a atraer grandes cantidades de capital para nuevas inversiones que puedan soportar el rápido crecimiento de la capacidad de producción de biocombustibles. Como resultado, la capacidad de producción de etanol de los EE.UU. excede, en gran medida, todas las proyecciones y podría alcanzar un volumen superior a los 46 billones de litros por año en el 2009 y, como objetivo en el 2012, alcanzar los 58 billones de litros (Fig. 1).

Los elevados precios del petróleo y las políticas gu-



**Figura 1.** Producción de etanol de EE.UU. y requerimiento de grano de maíz para su producción. Los valores para el año 2009 están basados en la capacidad existente y bajo construcción. Los valores para el año 2012 tienen en consideración subsidio continuo y precios del petróleo > US\$50/bbl.

bernamentales favorables también contribuyen a la expansión del biocombustibles en otros países con adecuados recursos de agua y suelo para soportar el crecimiento en producción. Ejemplos significativos son la producción de etanol a base de caña de azúcar en Brasil y de biodiesel a base de palma aceitera en Indonesia y Malasia. En cada uno de estos casos, la producción de biocombustible utiliza cultivos que pueden ser utilizados para la alimentación humana. Como resultado, el precio de los commodities como maíz, caña de azúcar y aceites vegetales se ha incrementado drásticamente. Los productores han respondido a los precios elevados incrementando las áreas sembradas con cultivos para destino de biocombustibles. En los EE.UU. existe un espacio pequeño para que se produzca un incremento del área agrícola total, situación por la cual se ha producido un dramático cambio de soja y algodón por el cultivo de maíz. El reporte del USDA del 29 de Junio de 2007 estimó que la superficie plantada con el cultivo de maíz en el año 2007 se incrementó en un 19% (+5.9 Mha) comparado con la situación del año 2006, mientras que la superficie del algodón y soja descendió un 15% (4.6 Mha) y 28% (1.71 Mha), respectivamente (<http://www.nass.usda.gov/index.asp>). Es de esperar un incremento substancial en el área de sembradío de caña de azúcar en Brasil, y de palma aceitera en Indonesia y Malasia.

Estas respuestas marcan la primera fase de la revolución del biocombustible, que probablemente continúe en el futuro cercano si el precio del petróleo se mantiene elevado o se incrementa aun más. La característica más notable de esta revolución es que el precio de los cultivos para la alimentación

humana, que pueden también ser utilizados para la producción de biocombustibles, va a ser determinado por el contenido en “conversión a energía”, en vez de su valor como alimento humano o para el ganado (CAST, 2006). Este cambio marcado en la valuación de la agricultura presenta varios temas críticos concernientes al impacto de la seguridad alimentaria global- especialmente para los sectores urbanos y rurales en los países de bajos ingresos- y los efectos en la calidad del ambiente, protección de los recursos naturales, y cambio climático. Estos temas van a ser considerados en las secciones posteriores, seguido por una discusión acerca de las necesidades de reenfoque de las investigaciones en agricultura a nivel nacional e internacional para asegurarse que la revolución de los biocombustibles no comprometa la seguridad alimentaria o los servicios ambientales.

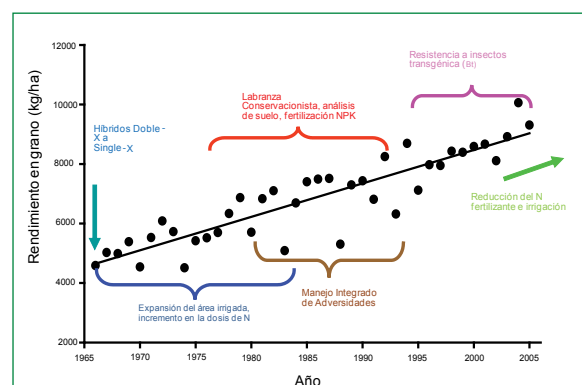
### Alimentos vs. Combustibles

Existe un debate considerable acerca del potencial para satisfacer las ambiciosas producciones de biocombustibles sin causar un excesivo aumento en el precio de los alimentos- en EE.UU. y a nivel global. Estas preocupaciones son mayores considerando que los EE.UU. produce el 40% de la producción global de maíz y cerca del 60% de las exportaciones de maíz a nivel mundial. De la misma manera, Indonesia y Malasia producen el 88% de la producción global de palma aceitera, el cual es el aceite vegetal de menos costo de los mercados mundiales. Sin embargo, las asociaciones de cultivos “commodities” y la industria de la semilla mantienen una visión optimista en cuanto a que los productores puedan fácilmente lograr estos objetivos. Por ejemplo, la Asociación de Productores de Maíz de los EE.UU. (NCGA) cree que será posible producir suficiente maíz para abastecer la demanda anual de la producción de etanol de 58 billones en el año 2015, y abastecer la demanda a nivel mundial para la producción y la exportación de alimentos (NCGA, 2006). La NCGA sostiene su proyección asumiendo una mayor expansión de la superficie con maíz y un aumento del doble de la tasa de crecimiento de los rendimientos del cultivo de maíz, considerando la línea histórica de tendencia de 40 años de crecimiento de la producción de este cultivo. El área del cultivo se incrementó cerca de 6.0 Mha en la campaña agrícola 2007, pero va a ser muy difícil el crecimiento futuro en área agrícola sin incrementar los precios de otros cultivos commodities tales como la soja y algodón o sin convertir las áreas marginales del Programa de Conservación de Reservas (CRP) para la producción de maíz. De hecho, los precios del cultivo de soja se han incrementado marcadamente en los últimos meses, siendo difícil pensar en un futuro cambio significativo del cultivo de soja por maíz. Realizando un pronóstico optimista de las tendencias futuras en los rendimientos del cultivo de maíz, la

NCGA confía en las proyecciones realizadas por los ejecutivos de la industria de las semillas. Por ejemplo, el Dr. Robert Fraley, Jefe de Tecnología de Monsanto, sugiere que el crecimiento de los rendimientos del cultivo de maíz se encuentra en un carril acelerado debido al impacto de la biotecnología y el mejoramiento molecular en los híbridos, especialmente con la estabilidad de los rendimientos en condiciones de sequía. El Dr. Fraley es citado por la NCGA estimando que la tasa de crecimiento de los rendimientos del cultivo de maíz se duplicaran o triplicaran y que los rindes “promedio” en los EE.UU. pueden alcanzar 16-19 tn/ha dentro de una generación (<http://www.ncga.com/news/OurView/pdf/2006/FoodANDFuel.pdf>), lo cual requiere una tasa exponencial de crecimiento anual de 2.3% en los rendimientos del cultivo de maíz. La pregunta es si estas proyecciones optimistas se alcanzan y como.

De hecho, la tendencia histórica de 40 años de los rendimientos de maíz es lineal, no exponencial, y se ha mantenido con un crecimiento anual de 112 kg/ha desde la década de los 60' (Fig. 2). Esta tasa de aumento representa solamente el 1.2% de la tasa de aumento relativo comparado con la línea de tendencia hasta el 2005, de 9.2 ton/ha. Debido a que los aumentos de rendimiento fueron incrementándose en forma lineal, la tasa relativa de ganancia decreció a través del tiempo como promedio de los incrementos en rendimientos. Por lo tanto, para que se cumpla la predicción de Fraley del 2.3% de tasa exponencial de incremento, se requiere de un abrupto salto en la tasa de ganancia de rendimientos y una aceleración constante del crecimiento de las productividades a través del tiempo.

Un poderoso set de innovaciones científicas y tecnológicas sostiene la tendencia lineal de incremento en los rendimientos del cultivo de maíz en los EE.UU. desde mediados de la década del 60's (Fig. 2). Nuevos métodos de mejoramiento, la expansión del



**Figura 2.** Tendencia de los rendimientos del cultivo de maíz en los EE.UU. a partir de 1966-2005 y las innovaciones tecnológicas que contribuyeron a los avances en rendimiento. La tasa de ganancia es de 112 kg/ha/año ( $R^2 = 0.80$ ). Modificado a partir de CAST, 2006.

área bajo riego, análisis de suelo y fertilización balanceada- incluyendo ambos macro y micronutrientes, labranza conservacionista, y un manejo integrado de plagas, malezas y enfermedades fueron dando fuerza a las innovaciones de los primeros 30 años en esta serie de tiempo. Maíces resistentes a insectos ("Bt"), cultivos transgénicos producidos mediante la ingeniería genética (GMO), fueron introducidos a mediados de la década de los 90's. Sin embargo, las inversiones de cientos de millones de dólares en genómica e ingeniería genética financiada por sectores públicos y privados, ha tenido un impacto adicional pequeño en los rendimientos de los híbridos de maíz. Más aún, algunos científicos discuten que es improbable que la ingeniería genética pudiera tener un impacto futuro substancial en características complejas tales como el rendimiento potencial o la resistencia a la sequía, basados en la premisa que la evolución ya ha optimizado tales características y que el mejoramiento convencional puede acceder a estas características en los germoplasmas existentes (Denison et al., 2003). Aunque los grupos de cultivos commodities y los ejecutivos de grandes compañías de semillas como Monsanto anuncian que el crecimiento del rendimiento del cultivo de maíz se está acelerando, no existe evidencia publicada en trabajos de revisión científica para substanciar estas declaraciones y explicar las razones de esta "aceleración". Igualmente preocupante es, el hecho que estas proyecciones optimistas han tenido una gran influencia en las prioridades de investigación para el Departamento de Agricultura (USDA) y el Departamento de Energía de los EE.UU. (DOE), como así también en las prioridades de préstamos del Banco Mundial y el CGIAR (Centro de Investigación Internacional en Agricultura) como el CIMMYT. Por ejemplo, mientras el USDA y el DOE están aumentando los fondos para investigación en genómica e ingeniería química para mejorar la conversión de biomasa celulósica a etanol, en la actualidad no existen fondos para acelerar la tasa de ganancia de los rendimientos de los cultivos, y realizar esto de manera que sea ecológicamente sustentable. Sin una aceleración en la tasa de crecimiento de los rendimientos, será muy difícil alcanzar la producción anual de 58 billones de litros de etanol para el año 2012 (Fig. 1), sin producir como consecuencia un gran incremento en los precios del maíz y un impacto asociado en los precios de los alimentos- especialmente carne y productos ganaderos. A pesar del optimismo de autoridades y ejecutivos de la industria de la semilla, es más probable que el rendimiento del cultivo se mantenga en el crecimiento lineal actual dentro de los próximos 10 años, sin un aumento substancial en los fondos destinados a investigación focalizados en identificar los factores limitantes del rendimiento del cultivo y buscar prácticas innovadoras de manejo del suelo y del cultivo, para garantizar la utilización de métodos ambientalmente sustentables.

Aunque la transición de la producción de etanol a partir de biomasa celulósica, no utilizada para alimentación, es una opción promisoría para reducir la intensidad de competencia entre los combustibles y alimentos, el desarrollo de una tecnología adecuada en la producción de biomasa, cosecha, transporte, almacenaje y la conversión a etanol, precisan al menos 7-10 años para una comercialización en gran escala. Mientras tanto, la capacidad de producción de biocombustibles a partir de cultivos alimenticios crecerá rápidamente. Por lo tanto, un tema clave es si la productividad puede crecer lo suficientemente rápido para alcanzar la demanda global de alimentos, alimentar, y generar combustible sin provocar impactos ambientales negativos.

### Sostenibilidad ambiental de los sistemas de biocombustibles

Las preocupaciones ambientales primarias acerca del rápido crecimiento global de la producción de los biocombustibles incluyen: (i) la presión para expandir el área de cultivo a zonas marginales o ecosistemas nativos tales como bosques tropicales y humedales, (ii) el impacto neto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y (iii) la baja eficiencia energética de algunos sistemas de biocombustibles, y en el caso de maíz-etanol, la afirmación que se requiere una mayor energía de ingreso ("input") que la energía de salida ("output"). Si estas preocupaciones no se pueden tratar con eficacia, el apoyo público para la industria de los biocombustibles es probable que decrezca marcadamente y las políticas favorables del gobierno en el apoyo a la expansión de las industrias de biocombustibles podrían ser eliminadas.

#### Expansión de la producción del cultivo

La clave para evitar la presión sobre el recurso es acelerar la ganancia de rendimiento de los cultivos y focalizar el área de expansión de los cultivos para biocombustibles como el maíz, soja y caña de azúcar, en regiones que tengan adecuadas reservas de suelo y clima óptimos para soportar la expansión sin generar impactos ambientales negativos. En un escenario posible, los EE.UU. podría focalizarse en la producción del cultivo de maíz a expensas del área de soja, lo cual podría proteger la conversión de tierras marginales (CRP), mientras que Brasil y Argentina podrían balancear esta reducción en producción de soja incrementando la superficie de cultivo. Esta opción reconoce el hecho que actualmente los rendimientos promedio de maíz de los EE.UU. son alrededor de 3 veces superiores al promedio de rendimiento en Brasil y un 26% mayor con respecto a la Argentina (Tabla 1). En contraste, los rendimientos del cultivo de soja son más comparables. Es también notable que la cantidad de maíz necesario para la producción

anticipada de etanol de EE.UU. en el año 2012 (140 MMt, Fig. 1), es 2.5 superior a las cantidades totales producidas actualmente por Brasil y Argentina. Esta estrategia requiere de un incremento de sistemas de producción de maíz continuo en los EE.UU., los cuales serán más susceptibles a problemas de insectos y requerirán dosis de fertilizante N superiores para sostener rendimientos altos. Aun con elevadas dosis de N, existe una disminución de rendimiento de cerca de 600 kg/ha en rotaciones con maíz continuo comparadas con rotaciones de maíz seguidos con soja, lo cual podría decrecer el rendimiento promedio de los maíces de EE.UU. Si bien Brasil es bendecido con largas reservas de tierras aptas aun no cultivadas para la producción de soja, la expansión en gran escala podría darse a expensas de los bosques tropicales, asociado con la deforestación en el Amazonas, con un impacto negativo en la biodiversidad y el cambio climático (Soares-Filho et al., 2006; Zhang et al., 2001). Se requieren políticas efectivas para asegurar una adecuada cantidad de zonas de bosque nativo a lo largo de los ríos y entre los mismos para interceptar los nutrientes lixiviados a partir de los sistemas agrícolas, como así también generar políticas de conservación para proteger largas cantidades de bosques tropicales nativos como reservas de biodiversidad. Otra preocupación, es el costo variable de la producción de soja en Brasil que es muy alto comparado con los EE.UU. y Argentina debido al clima tropical y a suelos ácidos poco fértiles en áreas donde la expansión del cultivo de soja está ocurriendo, lo cual requiere grandes cantidades de fertilizantes, aplicación de calcáreo y pesticidas.

### **Impacto neto sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la eficiencia energética**

Existe un largo cuerpo de evidencias que soporta la visión que los efectos netos del reemplazo del combustible derivado del petróleo con biocombustibles

resultaría en una reducción de las emisiones de los GEI y en un exceso neto de energía basado sobre las determinaciones del ciclo "campo al combustible" (Farrell et al. 2006; Hill et al., 2006). Una minoría de los investigadores concluye de otra manera (Patzek y Pimentel, 2005; Patzak, 2004). Los científicos que reportan un balance de energía neta negativo, utilizan datos sobre eficiencias y valores de "input" energéticos para la producción de cultivos y la conversión a etanol que se encuentran desactualizados. Asimismo, en el caso del maíz-etanol, estos científicos también fijan los límites, dentro de las mediciones del ciclo de vida, excluyendo un crédito de la energía por el uso del sub-producto de los granos destilados, como un reemplazo del maíz y la urea en las raciones del ganado vacuno. La mayoría de los ecologistas industriales estarían en desacuerdo con esta exclusión, debido a que ha habido un pequeño incremento en el número de cabezas de ganado, con respecto al gran incremento en la producción de etanol, por lo tanto un crédito de energía para el reemplazo de maíz y urea para alimentar el ganado es justificado.

En promedio, los ingresos de energía para la producción de maíz son cerca del 30% del total de energía utilizada en el ciclo de producción de maíz-etanol. La energía requerida para la producción de fertilizantes nitrogenados representa cerca del 50% del total de la energía utilizada en la producción de maíz. Por lo tanto, sistemas modernos de maíz que produzcan altos rendimientos con prácticas de manejo que incrementen la eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados contribuirían, en gran medida, a un mayor rendimiento total de etanol por unidad de superficie y una alta eficiencia energética en el ciclo de producción del etanol.

Del 70% del total de la energía del ciclo de producción utilizada en la planta de etanol, 70% es requerida para el procesamiento de granos, fermentación, y destilación, mientras que el remanente 30% es utilizado para el secado de los granos destilados (DDGS), sub-producto que puede ser fácilmente transportado

**Tabla 1.** Rendimientos de maíz y soja y producción total en Argentina, Brasil, EE.UU. y el mundo en los años 1966 y 2005, y la tasa de ganancia de rendimiento durante este período de tiempo.

País	1966		2005		% incremento/(tasa de ganancia) <sup>1</sup>	
	Maíz	Soja	Maíz	Soja	Maíz	Soja
	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )					
Argentina	2150	1160	7359	2729	242/(128)	135/(52)
Brasil	1307	1213	3040	2230	133/(43)	84/(25)
EE.UU.	4589	1709	9287	2839	102/(112)	66/(28)
Mundial	2210	1372	4929	2300	123/(68)	68/(23)
	Producción Total (MMt)				% incremento	
Argentina	7.04	0.018	20.45	38.30	190	212700
Brasil	11.37	0.595	35.11	51.18	209	8500
EE.UU.	105.86	25.270	282.31	85.04	167	237
Mundial	245.61	36.418	703.41	214.47	186	489

<sup>1</sup>Tasa de ganancia de rendimiento, 1966 a 2005, en kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.



y almacenado para el uso de alimentación del ganado. Mientras la mayoría de plantas de etanol producen DDGS, un número creciente de las plantas de etanol se localizan en un radio de 80 km de los feedlots, donde los granos destilados pueden ser utilizados “húmedos”, lo cual evita la necesidad de secado y reduce la energía necesaria a utilizar por las plantas de etanol.

Estudios recientes de los requerimientos de energía, para ambos etanol y fertilizantes nitrogenados, indican que el costo energético para la producción de maíz y la conversión a etanol son más pequeños que los estimados previamente (Liska et al., 2007). Más aún, a medida que los rendimientos promedio de maíz se incrementan (Fig. 2), se deben actualizar estas mediciones de ciclo de producción, basadas previamente en rendimientos menores de maíz que los actualmente alcanzados por los productores de los EE.UU. Utilizando valores actualizados para ingresos de energía y rendimiento en un ciclo de producción de maíz-etanol de los EE.UU., se obtienen estimadores mayores de la eficiencia neta de energía y una mayor mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, que en los estudios previos (Tabla 2). Comparado con estimaciones previas de Farrell et al. (2006), por ejemplo, el cociente de energía neta de una planta de etanol promedio que produce DDGS se incrementó de 1.20 a 1.47, mientras que los rendimientos de etanol se incrementan en un 5%, y la mitigación de gases de efecto invernadero aumentó desde un 13% a un 51%. Si la planta de etanol produce granos destilados húmedos, la eficiencia energética y la mitigación de gases de efecto invernadero se incrementarían a 1.80 y 60%, respectivamente.

Rendimientos elevados de maíz y de eficiencia de uso de insumos resultan en una gran eficiencia neta de energía, rendimiento de etanol y mitigación de los GEI. En nuestro Proyecto de Secuestro de Carbono, por ejemplo, se alcanzaron rendimientos promedio

del cultivo de maíz de 13.7 t/ha en lote de producción de 65 ha, con una rotación anual de maíz-soja con riego por pivot (Verma et al., 2005). Utilizamos un programa de manejo de la fertilización nitrogenada basado en rendimientos objetivo, contenido de materia orgánica, análisis de nitratos residuales basado en un test a 1 metro de profundidad, y crédito de nitrógeno por el cultivo de soja previo (<http://soil-fertility.unl.edu/>). El N es aplicado en tres veces, con 2/3 aplicado antes de la siembra del cultivo y dos aplicaciones iguales divididas a V6 y V10 a través del sistema de riego por pivot. En estos sistemas, se realizan mediciones de la eficiencia del fertilizante nitrogenado que son 60% superiores al promedio alcanzado por los productores de los EE.UU. a niveles de rendimiento 33% menores que los alcanzados en este trabajo de investigación (Arkebauer et al., 2004). Además, se optimizó la eficiencia de riego utilizando un sistema de riego con pivot a baja presión, con riegos programados y el suministro de la cantidad precisa para reemplazar la cantidad de agua evapotranspirada. Debido a que cerca del 75% de todo el maíz de Nebraska es producido con riego y asumiendo que todos los productores de Nebraska adopten las prácticas de manejo progresivas utilizadas en nuestro Proyecto de Secuestro de Carbono, debería ocurrir un mejoramiento de la eficiencia neta de la energía, el rendimiento de etanol, y la mitigación de los GEI comparado con los valores promedio actualizados de EE.UU. para la situación con “granos destilados secos” (Tabla 2). De hecho, el rendimiento del etanol de los sistemas con prácticas progresivas podría compararse con el rendimiento de etanol obtenido a partir de la caña de azúcar en Brasil.

## Rol crítico de la intensificación ecológica

La intensificación ecológica de los sistemas de

**Tabla 2.** Análisis del ciclo de vida energético y mitigación de los gases de efecto invernadero para los sistemas basados en maíz-etanol según Farrell et al. (2006) y con los valores actualizados para los requerimientos de “input” energéticos, diferentes métodos de procesamiento del sub-producto, y sistemas de producción de maíz.

Fuente	Cociente de Energía Neta <sup>†</sup>	Rendimiento de Etanol <sup>†</sup>	Mitigación de los GEI <sup>†</sup>
	MJ/L	L/ha	%
Promedio de EE.UU., Farrell et al., 2006	1.20	3830	13
Promedio de EE.UU., BESS <sup>‡</sup> modelo actualizado, Granos destilados secos	1.47	4040	51
Promedio de EE.UU., BESS <sup>‡</sup> modelo actualizado, Granos destilados húmedos	1.80	4040	60
Maíz irrigado de Nebraska, BESS <sup>‡</sup> modelo actualizado, manejo del cultivo, Granos destilados húmedos	2.36	5964	73

<sup>†</sup>El cociente de energía neta es el cociente de energía de salida con relación a la energía de entrada al sistema, incluyendo un crédito de energía para utilizar en los sub-productos del etanol, granos destilados. El rendimiento del etanol se basa sobre los 435 L/t conversión de grano a etanol y el rendimiento de maíz promedio en EE.UU. de 8.75 t/ha dado por Farrell et al. (2006) versus la línea de tendencia del año 2005 de 9.29 t/ha estimada a partir de la Figura 2. La reducción de los GEI es relativa a la energía base equivalente de la gasolina derivada de la combustión del petróleo.

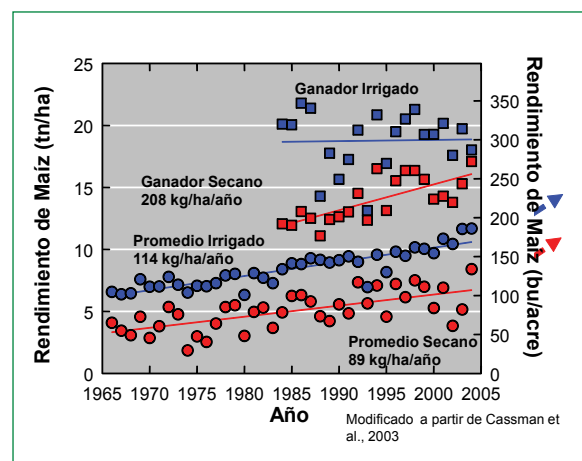
<sup>‡</sup>Basado sobre la determinación del ciclo de vida realizado por el Simulador de Sistema de Energía de Biocombustibles (Liska et al., 2007; disponible en [www.bess.unl.edu](http://www.bess.unl.edu)).

producción de cultivos provee un paso adelante para ayudar a aliviar la presión sobre los recursos globales, suelos y aguas, para satisfacer el aumento precipitado en la demanda por cultivos que puedan ser utilizados con destino de alimentos, alimentación y combustibles. La intensificación ecológica es una aproximación que busca cultivos que produzcan consistentemente cerca de sus potenciales de rendimiento genéticos bajo condiciones de riego, y cerca del rendimiento potencial limitado por agua en condiciones de secano, mientras que al mismo tiempo se provea a la protección de la calidad ambiental y la conservación de los recursos naturales (Cassman, 1999). Las características y los objetivos del sistema de intensificación ecológica incluyen:

- Rendimientos que alcancen consistentemente 85-90% del rendimiento genético potencial en sistemas irrigados, o del rendimiento potencial limitado por agua en sistemas de secano;
- Eficiencias de absorción de fertilizantes nitrogenados > 70% del N aplicado;
- Prácticas de manejo de suelo y residuos que mejoren la calidad del suelo, considerando las propiedades físicas, químicas y biológicas que soportan el crecimiento vegetal;
- Manejo integrado de plagas para minimizar el uso de pesticidas;
- Contribución neta a la reducción de los GEI basados en el análisis del ciclo de vida;
- En sistemas con riego: 90-95% eficiencia de uso del agua.

El rendimiento potencial es definido como el rendimiento que puede ser alcanzado con un híbrido adaptado o cultivar, cuando todos los posibles stress bióticos y abióticos han sido disminuidos o eliminados. Alcanzar el rendimiento potencial requiere un manejo de cultivo y de suelo perfectos, considerando la selección del híbrido o cultivar más apropiado para el ambiente y el tipo de suelo en particular, optimizando la fecha de plantación y la densidad de plantas, con un adecuado suministro y balance de todos los nutrientes esenciales, adecuada humedad disponible para el crecimiento del cultivo, y la eliminación de las pérdidas de rendimiento a partir de insectos, enfermedades y malezas. El rendimiento potencial en zonas de secano también debe presentar prácticas de manejo de cultivo y suelo adecuadas al ambiente, excepto por los contenidos de humedad del perfil que son determinados por la cantidad y la distribución de las precipitaciones de manera que el máximo rendimiento posible esta típicamente limitado por déficits de agua. Por ejemplo, mientras la línea de tendencia promedio para los cultivos de maíz irrigados obtenidos por los productores de Nebraska fue cerca de 11.2 t/ha, los ganadores de la competencia de rendimientos bajo riego prome-

diaron cerca de 20.0 t/ha (Fig. 3), lo cual significa que el rendimiento promedio fue tan sólo del 56% del rendimiento genético potencial. Existe también una brecha amplia entre el rendimiento promedio y el potencial en sistemas irrigados, como es estimado por la línea de tendencia con cultivos bajo riego. Un modelo de simulación de cultivos robusto y bien validado también provee una herramienta muy útil para la estimación de los rendimientos potenciales irrigados y limitados por agua (Yang et al., 2006). Sin embargo, es imposible para todos los productores lograr los mejores manejos del suelo y el cultivo perfecto. Esto se debe también por el bajo costo efectivo, debido a que los cultivos responden a los "inputs" tales como fertilizante o agua, disminuyendo la función de retorno a medida que el rendimiento se aproxima al techo de rendimiento potencial. Por lo tanto, los promedios de rendimientos más elevados que los productores de un país o una región pueden alcanzar son cerca del 85% de los rendimientos potenciales en sistemas irrigados o en secano. Cuando los rendimientos promedio se aproximan a este umbral del 85%, estos rendimientos se estancan, como si hubiesen tocado el techo de rendimiento potencial, lo cual ha ocurrido con los rendimientos promedio de arroz en Japón y en la mayor parte de China, y para el trigo en India (Cassman, 1999; Cassman et al., 2003). Utilizando la regla del 85%, los maíces irrigados de Nebraska no han explorado una brecha de rendimiento del 5.8 t/ha, entre los rendimientos promedio actuales (11.2 t/ha) y el 85% de rendimiento promedio potencial ( $\approx 20$  t/ha), que podría ser alcanzado mejorando el manejo del cultivo y del suelo; se debe considerar que en los sistemas de secano la brecha es también del mismo tamaño.



**Figura 3.** Tendencias de rendimiento en la competencia de altos rendimientos en Nebraska bajo riego y condiciones de secano según normas de la Asociación Nacional de Productores de Maíz, y tendencias en rendimiento promedio para condiciones irrigadas y de secano de los productores de Nebraska.

## Conclusiones

Inesperadamente hemos entrado en una nueva fase de la historia de la agricultura en la cual las tendencias a largo plazo de disminución de los precios reales para los productores de commodities desde la década de los 60's, ha sido abruptamente revertida debido a que nos encontramos en un mercado manejado por la demanda. El desafío es satisfacer este rápido y repentino incremento de la demanda, sin provocar destrucción de los bosques tropicales, humedales y pastizales remanentes, y asegurando la protección del ambiente. La intensificación ecológica de la agricultura provee un medio para alcanzar estos objetivos, pero hay muy pocos fondos económicos para soportar este tipo de investigación. Las inversiones en investigación proporcionadas por el sector público a nivel nacional y global están siendo focalizadas en determinaciones y entendimiento del impacto ambiental de la agricultura sin tener en consideración la productividad de los cultivos, y el sector privado ha enfatizado la productividad sin tener en cuenta el impacto ambiental. Estas tendencias deben cambiar y el cambio debe ser rápido con un substancial incremento en las inversiones para investigación focalizadas en la aceleración en la tasa de ganancia de rendimiento de los cultivos, como fue indicado en la Figura 3, y realizando esto de manera que decrezca el impacto de la agricultura sobre el ambiente. Se debe destacar también que el techo de rendimiento potencial de maíz (Duvick and Cassman, 1998) y arroz (Peng et al., 2000) no se ha incrementado en los últimos 30-40 años, sin embargo los mejoradores pueden mejorar la resistencia a los stress.

El sector agrícola se encuentra en una posición envidiable siendo un mercado dependiente de la oferta, por primera vez en muchas décadas. En gran parte, esta nueva era ha resultado de la convergencia de la energía y la agricultura. Evitando la escasez de alimentos y los incrementos excesivos de los precios de los alimentos a los consumidores, asegurando que la producción de cultivos para biocombustibles y alimentos no lleve a una degradación ambiental severa, y verificando que los sistemas de biocombustibles proporcionen los beneficios esperados de mitigación de los GEI y reemplazo del combustible en base de petróleo, son puntos críticos para la sostenibilidad de esta nueva era, sin provocar un sentimiento público negativo y políticas gubernamentales desfavorables que podrían abortar esta revolución antes de su comienzo.

## Referencias Bibliográficas

Arkebauer T., A. Dobermann, K. Cassman, R. Drijber, J. Lindquist, J. Specht, D. Walters y H. Yang. 2004. N-use efficiency improves in ecological intensification project. *Fluid Forum* 12(3): 17-19.

Cassman K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. National Acad. Sci. (USA)* 96: 5952-5959.

Cassman K.G., A. Dobermann, D.T. Walters y H. Yang. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Ann Rev Environ Resour* 28: 315-358.

Council for Agricultural Science and Technology (CAST). 2006. Convergence of Agriculture and Energy: Implications for Research and Policy. CAST Commentary QTA 2006-3. CAST, Ames, Iowa.

Denison R.F., T.E. Kiers y S.A. West. 2003. Darwinian agriculture: When can humans find solutions beyond the reach of natural selection? *Quart Rev Bio* 78:145-167.

Duvick D.N. y K.G. Cassman. 1999. Post-green-revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. *Crop Sci.* 39:1622-1630.

Farrell A.E., R.J. Plevin, B.T. Turner, A.D. Jones, M. O'Hare y D.A. Kammen. 2006. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science* 311:506-508. Hecht S.B. 2005. Soybeans, development, and conservation on the Amazon frontier. *Development and Change* 36:375-404.

Hill J., E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky y D. Tiffany. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biocombustibles and ethanol biofuels. *Proc Nat Acad Sci (USA)* 103:11206-11210.

Liska A.J., H.S. Yang, V. Bremer, W.T. Walters, D. Kenney, P. Tracy, G. Erickson, R. Koelsch, T. Klopfenstein y K.G. Cassman. 2007. Biofuel Energy Systems Simulator: LifeCycle Energy and Emissions Analysis Model for Corn-Ethanol Biofuel (ver. 1.0, 2007). University of Nebraska, www.bess.unl.edu.

National Corn Growers Association (NCGA). 2006. How much ethanol can come from corn? <http://www.ncga.com.v.2.pdf> (26 October 2006).

Patzek T.W. 2004. Thermodynamics of the corn-ethanol biofuel cycle. *Critical Rev. Plant Sci.* 23:519-567.

Peng S., R.C. Laza, R.M. Visperas, A.L. Sanico, K.G. Cassman y G.S. Khush. 2000. Grain yield of rice cultivars and lines developed in the Philippines since 1966. *Crop Sci.* 307-314.

Pimentel D. y T.W. Patzek. 2005. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood. *Biocombustibles Production Using Soybean and Sunflower.* *Nat. Resour. Res.* 14:65-76.

Soares-Filho B.S., D.C. Nepstad, L.M. Curran, G.C. Cerqueira, R.A. Garcia, C.A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre y P. Schlesinger. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 520-523.

Verma S.B., A. Dobermann, K.G. Cassman, D.T. Walters, J.M. Knops, T.J. Arkebauer, A.E. Suyker, G.G. Burba, B. Amos, H.S. Yang, D. Ginting, K.G. Hubbard, A.A. Gitelson y E.A. Walter-Shea. 2005. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 131:77-96.

Haishun Y., A. Dobermann, K.G. Cassman y D.T. Walters. 2006. Features, Applications, and Limitations of the Hybrid-Maize Simulation Model. *Agron. J.* 98:737-748.

Zhang H., A. Henderson-Sellers y K. McGuffie. 2001. The compounding effects of tropical deforestation and greenhouse warming on climate. *Climatic Change* 49:309 – 338. <