

**Estudio de factibilidad económica para la
producción de switchgrass (*Panicum
virgatum*) en Carolina del Sur, como materia
prima para la generación de bioenergía**

César Emilio Castellón Chicas

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2009

ZAMORANO
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

Estudio de factibilidad económica para la producción de switchgrass (*Panicum virgatum*) en Carolina del Sur, como materia prima para la generación de bioenergía

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Administración de Agronegocios en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

César Emilio Castellón Chicas

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2009

Estudio de factibilidad económica para la producción de switchgrass (*Panicum virgatum*) en Carolina del Sur, como materia prima para la generación de bioenergía

Presentado por:

César Emilio Castellón Chicas

Aprobado:

Fredi Arias, Ph.D.
Asesor principal

Lic. Ernesto Gallo, M.Sc. M.B.A.
Director
Carrera de Administración de
Agronegocios

Carlos Carpio, Ph.D.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

RESUMEN

Castellón C. 2009. Estudio de factibilidad económica para la producción de switchgrass (*Panicum virgatum*) en Carolina del Sur, como materia prima para la generación de bioenergía. Proyecto de Graduación del Programa de Ingeniería en Administración de Agronegocios, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 47p.

En los últimos años ha incrementado el interés por el desarrollo de fuentes de energía renovables, en respuesta a la preocupación generada por el agotamiento de los combustibles fósiles y el impacto negativo de estos en el medio ambiente. Switchgrass (*Panicum virgatum*) es un pasto perenne, nativo de Norteamérica, que ha sido identificado como un cultivo energético promisorio debido a sus altos rendimientos en producción de biomasa y su capacidad de adaptación a ambientes marginales. El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la factibilidad económica que tendría para los agricultores del estado de Carolina del Sur la producción de switchgrass y su consecuente comercialización como materia prima para la generación de bioenergía. Con este objetivo se desarrollan presupuestos operativos para las etapas del ciclo productivo del cultivo y un presupuesto de capital para sus años de producción. Adicionalmente, se identifican y analizan como factores de riesgo potencial, el precio que podría obtener el cultivo en el mercado y los precios reales de sus principales insumos. Los resultados del análisis indican que switchgrass podría representar una alternativa viable de negocio, bajo la consideración de sus externalidades positivas en la determinación del precio de mercado.

Palabras clave: presupuesto operativo, riesgo, energía, biomasa, precio real, externalidad positiva.

CONTENIDO

Portadilla.....	I
Página de firmas	II
Resumen	III
Contenido	IV
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
4. RESULTADOS	25
5. CONCLUSIONES.....	38
6. RECOMENDACIONES	40
7. LITERATURA CITADA.....	41
8. ANEXOS	45

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro

1. Resumen de estimaciones de costos, precios, producción y utilidad para los diferentes escenarios citados en la literatura.	14
2. Costos para el primer año de establecimiento (USD\$/ha).....	25
3. Costos para el segundo año de establecimiento (USD\$ /ha).....	25
4. Costos anuales de producción, del tercer al décimo año, (USD\$ /ha)	26

Figura

1. Producción anual por cultivares (tierras-bajas/amarillo y tierras-altas/azul), agrupados por el número de cosechas anuales.	6
2. Producción promedio por cultivar (Cultivares de tierras-bajas en amarillo y	7
3. Impacto ambiental relativo de diferentes opciones de bioenergía.....	9
4. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de etanol (USD\$/t).....	27
5. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de etanol (USD\$/t). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2009.	29
6. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de biopoder (USD\$/t). .	29
7. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de nitrógeno (USD\$/kg).	30
8. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales -de nitrógeno (USD\$/kg). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2008.	30
9. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de diesel (\$/l).....	31
10. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de diesel (\$/l). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2009.	31
11. Distribución de probabilidad de densidad para la utilidad anual en USD\$ por hectárea cultivada de switchgrass.....	32
12. Distribución de probabilidad para la utilidad anual en USD\$, por hectárea de switchgrass. Distribución con media aritmética ajustada utilizando precios reales del 2003 al 2009 para las variables de precio de nitrógeno y diesel.	33

13. Distribución de retornos netos simulados en USD\$, para una hectárea de switchgrass cultivada como materia prima para la generación de biopoder.	34
14. Distribución de probabilidad para los retornos simulados de switchgrass en USD\$/ha, asumiendo que se comercializa como materia prima para la producción de etanol.....	35
15. Distribución de probabilidad del valor presente neto en USD\$, simulado para un establecimiento de switchgrass de una hectárea en un período de diez años.	36
16. Distribución de probabilidad del valor presente neto en USD\$, simulado para un establecimiento de switchgrass de una hectárea en un período de diez años y utilizando variables ajustadas.	37

Anexo

1. Serie de tiempo sobre los precios de switchgrass como energía equivalente a la gasolina (USD\$/t).	45
2. Serie de tiempo para precios históricos de nitrógeno (USD\$/kg).	45
3. Serie de tiempo para los precios de diesel (USD\$/l).....	46
4. Presupuesto de capital para un establecimiento de switchgrass a diez años (USD \$/ha).	47

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que “el consumo de energía mundial se incrementa en 50% entre los años 2005 y 2030. Así mismo se proyecta que los precios del petróleo y gas natural continúen creciendo durante este periodo” (U.S. DOE 2008, EIA 2008). De acuerdo a la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA por sus siglas en inglés) (2006) éstos sólo poseen 3% de las reservas mundiales de petróleo sin embargo, consumen un 25% de las mismas, razón por la que ésta nación es altamente dependiente de las importaciones. Parrish y Fike (2008) y Solomon et al. (2007) coinciden en señalar que los dos aspectos de mayor importancia son: (i) la creciente amenaza del agotamiento de los combustibles fósiles y (ii) la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ provenientes del uso de los mismos.

Por lo tanto, se han emprendido múltiples estudios para el desarrollo de fuentes de energía renovables, que sean sustentables en el largo plazo, siendo la bioenergía una de las alternativas consideradas. “La bioenergía incluye los biocombustibles (líquidos y gases) y el biopoder (se denomina así al calor o electricidad generados al quemar biomasa)” (Parrish y Fike 2008). De estos tipos de bioenergía, “los biocombustibles son los más conocidos dado el amplio uso y estudios sobre biodiesel y etanol, especialmente en los Estados Unidos y Brasil” (Solomon *et al.* 2007). No obstante, en los últimos años han surgido fuertes polémicas relacionados con la producción y uso de etanol, poniendo en duda su naturaleza renovable y relacionándolo con el incremento en el precio de los alimentos, ya que en los Estados Unidos es producido mayormente a base de maíz.

En respuesta a esta polémica han surgido nuevas generaciones de etanol que requieren biomasa como materia prima. De acuerdo con McLaughlin (1992) programas de desarrollo de etanol en los Estados Unidos se iniciaron en 1978 con el establecimiento del Programa de Desarrollo de Materia Prima para Bioenergía (BFDP por sus siglas en inglés) con el objetivo de identificar y desarrollar árboles y cultivos herbáceos de rápido crecimiento que pudieran ser utilizados como materia prima en la generación de bioenergía. Concluyendo en 1991 que el foco del programa debían ser cultivos perennes de alta producción de biomasa, destacando entre estos últimos, switchgrass.

Actualmente “después del maíz (*Zea mays*), la especie herbácea que ha ganado mayor atención como cultivo energético en los Estados Unidos es switchgrass” (McLaughlin y Kszos 2005, Parrish y Fike 2005, Sanderson et al. 1996). McLaughlin y Kszos (2005) atribuyen el éxito de switchgrass a su capacidad de adaptación a suelos y condiciones marginales, como ser secas y pobres niveles de nutrientes. Además, éste genera un impacto positivo en el ambiente ya que provee un medio favorable para el desarrollo de la vida silvestre (debido a su naturaleza perenne), evita la

erosión a través de su profundo sistema radicular y es capaz de captar altos volúmenes CO₂.

En cuanto a su morfología, Parrish y Fike (2008) establecen que switchgrass es una C4 de estación cálida, que cuenta con dos variedades morfológicas, los cultivares de tierras altas y los cultivares de tierras bajas, de los cuales los segundos han demostrado obtener mayor rendimiento en producción de biomasa por unidad de área.

El futuro de los biocombustibles es promisorio y actualmente impulsado por diversos mecanismos gubernamentales, entre ellos el “Acta de Independencia y Seguridad Energética (EISA por sus siglas en inglés), firmada en Diciembre de 2007, donde se establece una meta de 36 mil millones de galones de biocombustible para el 2022, de los cuales 15 mil millones deben provenir de etanol de maíz y 21 mil millones de fuentes avanzadas de biocombustibles, entre ellas etanol a partir de celulosa” (Baker *et al.* 2008).

Este estudio busca evaluar la rentabilidad económica que tendría para los agricultores de Carolina del Sur, la producción switchgrass como materia prima para la generación de bioenergía. Se han considerado estudios similares desarrollados en Tennessee, Iowa, Texas y otros estados. La variedad considerada es Alamo, un cultivar de tierras bajas que de acuerdo con McLaughlin *et al.* (1999) es el más prometedor para la Región Sur de los Estados Unidos.

La metodología utilizada comprende el desarrollo de presupuestos operativos estándar para la cuantificación de los costos de producción y establecimiento del cultivo. Así mismo, se desarrolló un modelo de simulación Montecarlo para evaluar los flujos netos del proyecto, considerando como fuentes de incertidumbre los precios futuros de fertilizantes y combustibles, así como el precio que los productores podrían recibir si switchgrass se comercializara como materia prima para bioenergía.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El surgimiento de plantas procesadoras de biomasa en Carolina del Sur, para la generación de bioenergía, principalmente biopoder mediante el desarrollo de pellets y bloques a base de residuos forestales y switchgrass ha abierto un nuevo mercado para los agricultores del estado quienes jugarían el rol de proveedores de biomasa mediante el establecimiento de cultivos perennes como switchgrass.

Es en este contexto, en que la necesidad de un estudio que cuantifique los costos, así como la factibilidad que tendría para los agricultores el destinar sus tierras al cultivo de switchgrass, se vuelve evidente.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio marcará una primera pauta hacia la estimación del potencial económico de la producción de switchgrass en Carolina del Sur como materia prima para el mercado de bioenergía. Será un punto de partida para establecer las ganancias que tendrían los granjeros al producir switchgrass en contraparte a los cultivos tradicionales de la región.

1.3 LÍMITES DEL ESTUDIO

El presente estudio cuenta con las siguientes limitantes:

- Es específico para la producción de switchgrass (*Panicum Virgatum*) cultivar Alamo.
- Evalúa únicamente la factibilidad económica del cultivo al ser comercializado como biomasa.
- Los programas de siembra, fertilización, herbicidas y cosecha fueron desarrollados con base en los requerimientos posibles del cultivo bajo las condiciones de Carolina del Sur.
- Los precios simulados no consideran las externalidades positivas de switchgrass en cuanto a reducción de emisiones de CO₂.
- El estudio no considera los costos de transporte de switchgrass desde el campo hasta una planta de procesamiento.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad económica que tendría para los agricultores de Carolina del Sur la producción y comercialización de switchgrass (*Panicum Virgatum*) como materia prima para la generación de bioenergía.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar los costos e ingresos involucrados con los años de establecimiento y madurez del cultivo.
- Cuantificar el retorno neto de efectivo generado por el cultivo al final de su periodo de vida.
- Identificar el riesgo involucrado en la actividad productiva como resultado de variaciones en la producción, precios de los insumos y precio del producto.
- Desarrollar una herramienta que permita a los agricultores de Carolina del Sur cuantificar sus costos de producción en función de su condición particular.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 PANORAMA GENERAL

“Switchgrass, *Panicum virgatum* L., es un pasto perenne de estación cálida, nativo de Norte América; que ha sido históricamente parte importante de las praderas norteamericanas de pastos altos de alta producción. Este pasto se encuentra disperso desde México hasta Quebec y tolera una amplia variedad de condiciones de crecimiento, desde sitios áridos en las praderas de pastos bajos hasta pantanos y bosques abiertos. A través de su distribución hay dos formas morfológicas y genéticas distintas o eco-tipos, uno de tierras bajas generalmente encontrado en climas y hábitats sureños y una variedad de tierras altas típicamente encontrada en latitudes norte con ambientes secos y semiáridos” (Porter 1966; Sanderson *et al.* 1996; Hultquist *et al.* 1997; Casler *et al.* 2004).

“Morfológicamente, switchgrass puede crecer en la región sur-este, hasta más de 3m de altura, pero lo que es más distintivo es su profundo y vigoroso sistema radicular, que puede extenderse a profundidades mayores de los 3.5 metros” (Weaver 1968). Este se reproduce tanto por semillas como vegetativamente. “La producción de biomasa generada en el sistema radicular de switchgrass puede exceder a la del exterior” (Shifflet y Darby 1985), “dándole así, una ventaja en la adquisición de agua y nutrientes aún bajo condiciones de estrés” (Mc Laughlin *et al.* 1999).

“Comparaciones de desempeño en producción demuestran que “Alamo” es el cultivar de tierras-bajas más promisorio para la producción de bioenergía en el sur” (Mc Laughlin *et al.* 1999).

2.2 ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO

“Switchgrass puede desarrollarse en condiciones que no serían factibles para otros cultivos, incluyendo tierras que serían muy erosionadas para la producción de maíz” (Mc Laughlin *et al.* 1999).

De acuerdo con Parrish y Fike (2005) y Larson (2008), switchgrass puede presentar problemas durante su establecimiento debido a la innata dormancia de sus semillas, la humedad del suelo y la competencia con malezas. Los factores anteriormente descritos deben ser considerados como puntos críticos para el desarrollo de los programas de siembra y herbicidas del cultivo. “Una buena regla de dedo parece ser que, si al final del año de establecimiento el número de plantas por pie cuadrado es mayor o igual a dos, la plantación puede tener éxito” (Schmer *et al.* 2006, Wolf y Fiske 1995).

McLaughlin *et al.* (1999) manifiesta que switchgrass requiere de tres años para alcanzar su completo establecimiento. “Durante el primer año el cultivo alcanza un 14% de su potencial, un 60% durante el segundo año y su desarrollo completo en el tercero. En la mayoría de los casos se recomienda iniciar la cosecha hasta el segundo año” (Mooney *et al.* 2008). De igual modo, “la sabiduría convencional es evitar fertilizaciones de Nitrógeno durante el año de establecimiento para evitar la presión de malezas” (Brejda *et al.* 1998).

2.3 MADUREZ

Como se mencionó anteriormente, switchgrass alcanza su madurez al tercer año sin embargo, un mejor indicador podría ser el hecho de que, “cultivos maduros, y de alta producción a menudo tienen menos de una planta por pie cuadrado” (Cassida *et al.* 2005). Es importante rescatar que “la producción de switchgrass para bioenergía puede reducir enormemente los requerimientos de nitrógeno en comparación a su utilización para producción de heno” (Thomason *et al.* 2004), de igual manera Parrish *et al.* (2007) afirman que la respuesta de switchgrass a aplicaciones de P y K es limitada, ambas características sugieren una fuerte reducción en costos. En cuanto a plagas, no se espera que las malezas sean un problema en los años pos-establecimiento (Parrish *et al.* 2007), de igual manera, “los insectos, son considerados de limitada significancia en el período pos-establecimiento sin embargo, esto puede cambiar en la medida en que el área de cultivo aumenta” (Parrish *et al.* 2007).

Larson (2008) califica la naturaleza perenne así como sus tres años de establecimiento como una fuente de riesgo para los agricultores, debido a que una vez establecido la capacidad de respuesta del productor a cambios en el mercado es limitada.

2.4 COSECHA

2.4.1 Sistemas de Cosecha

De acuerdo con Gunderson *et al.* (2008) switchgrass puede ser producido bajo sistemas de una única cosecha o múltiples cosechas sin embargo, sistemas de más de dos cosechas anuales demuestran decrecimientos significativos en producción.

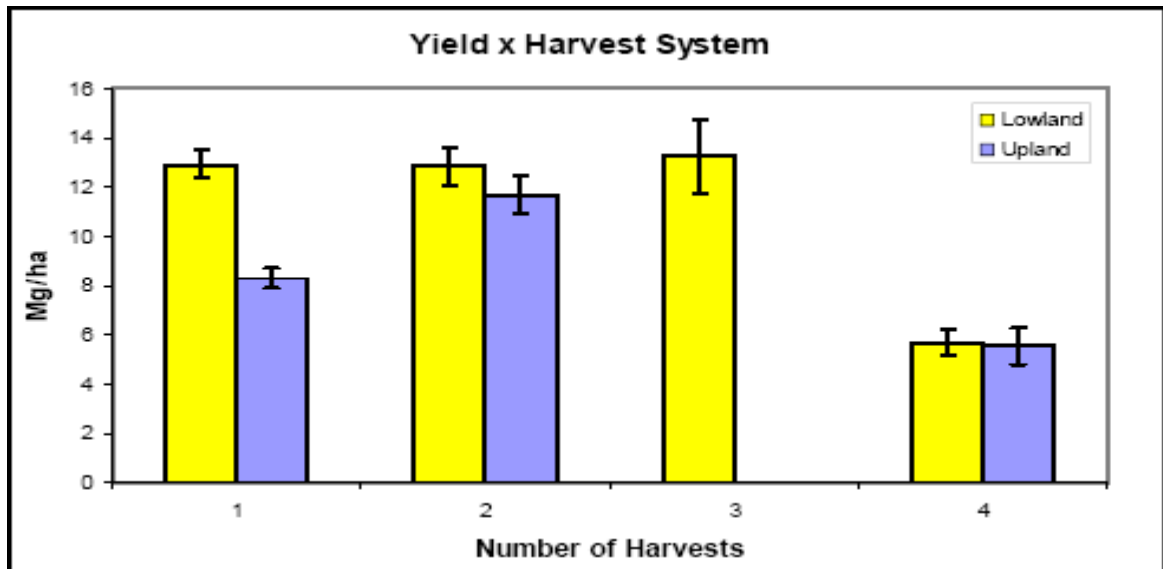


Figura 1. Producción anual por cultivares (tierras-bajas/amarillo y tierras-altas/azul), agrupados por el número de cosechas anuales.

Fuente: Gunderson *et al.* 2008.

La Figura 1 muestra la producción anual de un cultivo de switchgrass ya establecido y expuesto a diferentes sistemas de cosecha. “Como puede observarse, no se encontraron diferencias significativas en rendimientos entre sistemas de una cosecha o sistemas de dos cosechas, para cultivares de tierras-bajas” (Gunderson *et al.* 2008).

“Establecimientos de switchgrass no deben ser cosechados más de dos veces por año y a menudo una cosecha provee tanta biomasa como dos. Cosechando una vez que la biomasa a atravesado el proceso de senescencia puede ayudar a la persistencia del cultivo, facilitar operaciones de cosecha, conservar N e incrementar la calidad de la materia prima” (Parrish *et al.* 2007).

“Una única cosecha a finales de la estación de otoño puede proveer rendimientos de biomasa sostenibles y más altos en el largo plazo, así como materia prima de mejor calidad” (Madakadze 1999).

“Sistemas de una única cosecha requieren menos energía que los sistemas de dos cosechas y por esto son recomendados en la mayoría de las situaciones, particularmente en regiones áridas” (Sanderson *et al.* 1999).

2.4.2 Aplicación de N

“Una única cosecha al final de la estación (Noviembre) remueve mucho menos N. Los niveles de N en la biomasa de switchgrass pueden ser mayores o iguales al 2% durante la estación de crecimiento, pero el N puede caer a niveles de 0.5% en la senescencia o biomasa muerta, después de que la planta ha reciclado N en sus raíces” (Madakadze

1999). Así, una única cosecha pos-senescencia removerá aproximadamente 10 lb de N por tonelada de biomasa. De hecho, “los niveles bajos de N en la biomasa pueden ser un factor positivo de calidad en algunas tecnologías de conversión” (Fike *et al.* 2007).

“Como línea guía general, los productores de switchgrass para bioenergía deberían aplicar 10 lb de N por tonelada de biomasa cosechada por acre. En algunos casos, tan sólo 5 lb de N por tonelada cosechada por acre podría ser adecuado para sostener una única cosecha pos-senescencia” (Parrish y Fike 2007). McLaughlin (1999) establece que el sistema de una única cosecha remueve un 66% menos de N que el sistema de dos cosechas anuales.

2.4.3 Producción entre cultivares

A continuación se establece una comparación entre cultivares de tierras-altas y tierras-bajas, a fin de identificar las diferencias en rendimientos a través de cultivares.

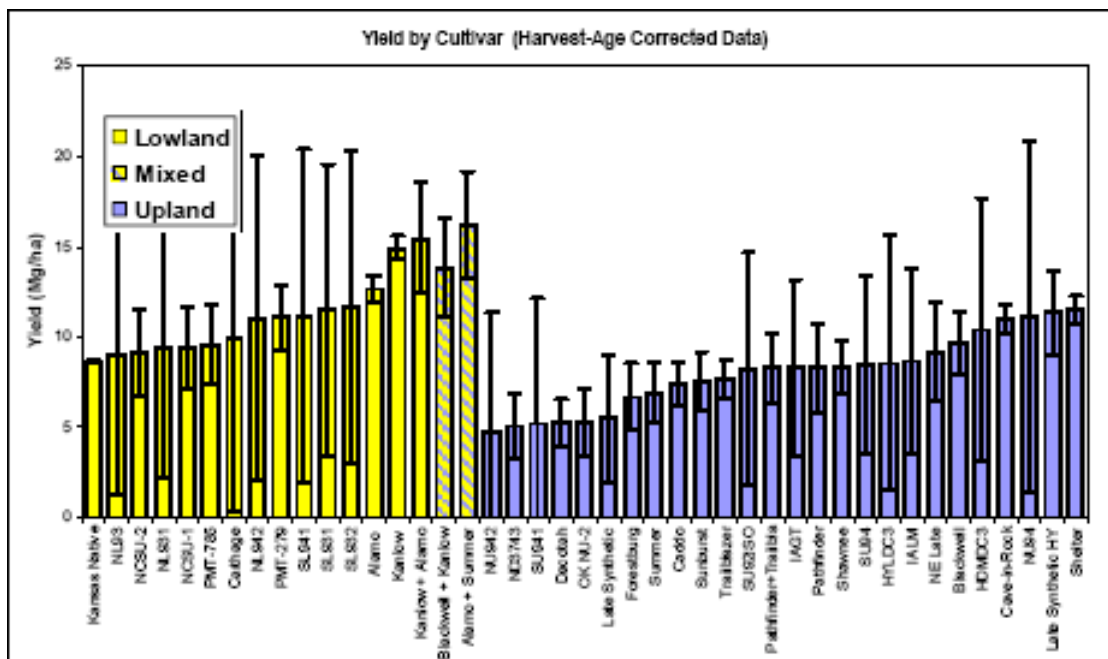


Figura 2. Producción promedio por cultivar (Cultivares de tierras-bajas en amarillo y los de tierras-altas en azul).

Fuente: Gunderson *et al.* 2008.

Gunderson *et al.* (2008) demuestran que en términos generales, aún bajo variaciones de cosecha y establecimiento, los cultivares de tierras bajas tienden a producir, en promedio, más que los cultivares de tierras altas, como se observa en la Figura 2. Además establecen la existencia de relaciones significativas entre la localización del cultivo y el cultivar utilizado, en cuanto a producción de biomasa. De acuerdo con McLaughlin *et al.* (1999)

Alamo es el cultivar de tierras-bajas más prometedor para la Región Sur de los Estados Unidos.

2.4.4 Consideraciones adicionales

“La producción potencial de switchgrass generalmente aumenta al disminuir la latitud (con la excepción de la península de Florida) por el incremento asociado en la longitud de la estación de crecimiento y la adaptación de cultivares más productivos” (Casler 2007).

“Cosechas tardías de switchgrass contienen generalmente una menor cantidad de cenizas” (Sanderson y Wolf 2005), lo que se traduce en materia prima de mayor calidad para combustión, de acuerdo a McLaughlin *et al.* (1996).

2.4.5 Rendimientos esperados

McLaughlin *et al.* (1999) realizaron un estudio de varias plantaciones maduras de switchgrass a través de los Estados Unidos, identificando una producción promedio de 6.35 t de materia seca por hectárea. En general, la bibliografía citada sugiere una amplia variación en la producción de biomasa una vez establecido el cultivo, en función de factores como el cultivar utilizado, temperatura, precipitación, latitud, sistema de cosecha, aplicación de N, entre otros.

2.5 PRODUCCIÓN DE ETANOL

2.5.1 Impacto ambiental

Como se mencionó anteriormente, uno de los propósitos de producir switchgrass para la generación de bioenergía es reducir las emisiones de CO₂ que actualmente generan el uso de combustibles fósiles sin embargo, la utilización de switchgrass para la generación de biocombustibles, como ser el caso de etanol, ha sido fuertemente debatida por su balance energético que algunos aseguran, es negativo. Este estudio cita a continuación algunas de las fuentes revisadas, a las que el lector puede suscribirse si desea obtener más información acerca del tema, y se limita a expresar que el balance positivo o negativo de switchgrass para la producción de etanol, es un área extensa, que aún requiere más estudio.

De acuerdo con Sun y Cheng (2002) el proceso de conversión de biomasa a etanol, incluye dos procesos: (i) la hidrólisis de la celulosa en materiales de lignocelulosa para su subsecuente fermentación y conversión a azúcares y (ii) la fermentación de esos azúcares a etanol.

“La conversión de biomasa a etanol no es viable comercialmente; sin embargo, considerable investigación y desarrollo están siendo realizados para comercializar las tecnologías” (Kotrba 2008).

“La producción de etanol de celulosa, en particular, puede resultar en un combustible con una producción neta de CO₂ casi neutral” (Worldwatch Institute 2006).

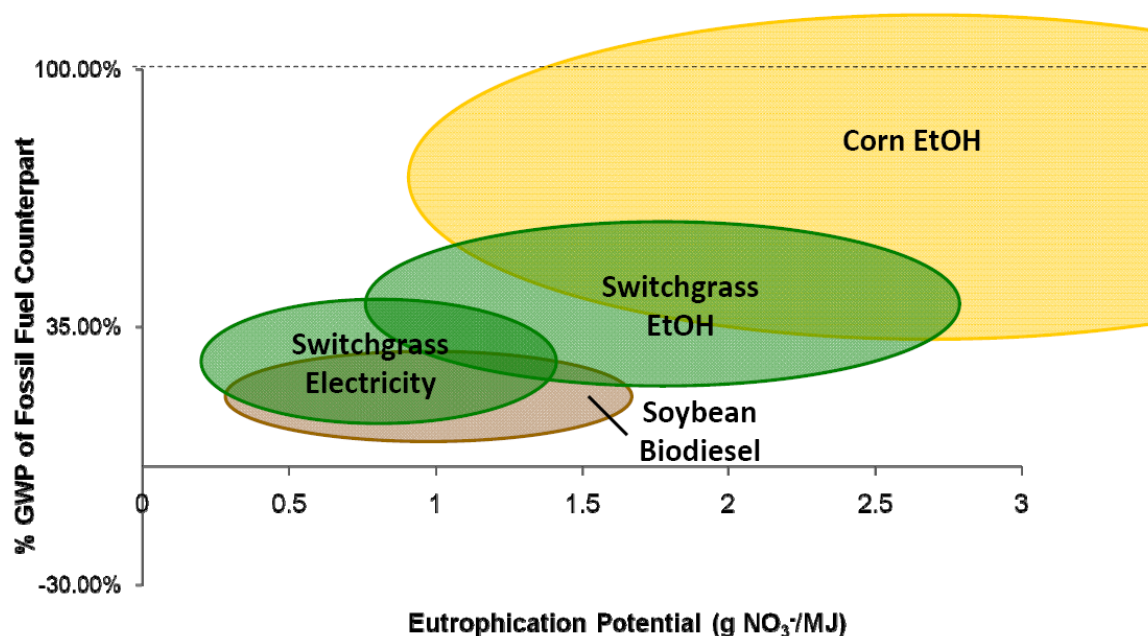


Figura 3 Impacto ambiental relativo de diferentes opciones de bioenergía.

Fuente: Miller, 2009

Miller (2009) expone que la manera en que se evalúa el ciclo de vida de los cultivos, puede generar conclusiones distintas acerca de su sostenibilidad. Así, expone en la Figura 3, el impacto ambiental de diferentes fuentes de bioenergía en función de su potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés) y su potencial de eutrofización. Como se aprecia, aún cuando el etanol de switchgrass resulta en un impacto positivo (en comparación a otras fuentes), la producción de electricidad a partir de éste resulta en un impacto positivo aún mayor.

2.5.2 Costos

“Los costos por galón (sin incluir materia prima) de producir etanol de maíz y etanol de celulosa son USD\$ 0.76 y USD\$ 0.97, respectivamente” (Paulson y Ginder 2007; Tokgoz *et al.* 2007). No obstante, “el etanol tiene aproximadamente dos-tercios del valor energético de la gasolina” (Shapouri *et al.* 1995).

“La producción de etanol (utilizando maíz como materia prima) en una planta industrial de alta producción es cerca de 1 l. de etanol por cada 2.69 kg de granos de maíz” (Pimentel 2001). Adicionalmente Pimentel y Patzek (2005) establecen que el etanol de maíz genera bajos niveles de ganancias para los granjeros, causa erosión e involucra el uso excesivo de fertilizantes y herbicidas en el área de campo. Sin embargo, reconocen que la producción de etanol a través de celulosa, particularmente utilizando switchgrass como materia prima, tiene un retorno energético negativo del 50%, e involucra un costo de USD\$ 0.54, en contraparte al etanol de maíz que cuesta USD\$ 0.42.

De acuerdo a Vadas *et al.* (2008) el maíz genera una mayor producción de etanol que la proporcionada por switchgrass, sin embargo los costos involucrados en la producción de maíz son mayores, a la vez que genera erosión y demanda grandes cantidades de Nitrógeno.

Simulaciones de producción de etanol de celulosa, desarrolladas por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) (1991) indican una producción de 98 galones de etanol por tonelada de materia seca de biomasa para plantas operando en el año 2010.

Wang *et al.* (1999) estiman la energía contenida en un galón de etanol en 76,000 Btu e indican un balance energético neto positivo entre 20,000 y 25,000 Btu por galón de etanol de maíz y 60,000 Btu por galón de etanol de celulosa.

Solomon *et al.* (2007) establecen que los costos del etanol de celulosa podrían ser menores que los de la gasolina y que su precio comercial podría llegar a ser competitivo con el de ésta.

2.6 GENERACIÓN DE BIOPODER

Se estableció anteriormente que una de las formas que toma la bioenergía es el biopoder, el cual consiste en la obtención de calor o electricidad mediante la combustión de biomasa. Así, switchgrass ha sido identificado como un recurso potencial para la generación de biopoder, mediante la elaboración de pellets y bloques que pueden ser quemados tanto de manera independiente como en conjunto con carbón (co-quema), en un intento por reducir las emisiones de CO₂. Esta es una tecnología que ha demostrado tener un balance energético positivo, como se expondrá a continuación.

Jannasch *et al.* (2001) desarrollaron un estudio para Canadá, evaluando la eficiencia de pelletizar switchgrass, en comparación con otros cultivos como alfalfa. El proceso de pelletización descrito por ellos comprende el secado y quiebre de las pacas, la agregación de agua y vapor a la materia prima, en un extrusor, para la formación de una masa y el posterior paso de ésta a través de cribas para la formación de pellets. Entre los resultados de su estudio encontraron ventajas significativas en la utilización de switchgrass, ya que el tiempo de corte de las pacas es 30% menor que el requerido para las pacas de alfalfa, a su vez, por su bajo contenido de humedad al momento de cosecha switchgrass no requiere de un proceso de secado, lo que abarata los costos. La producción de pellets de switchgrass

es de 20 a 22 lb por Hp utilizado, siendo de 357, 634.4 Btu la energía requerida para procesar una tonelada.

“Las emisiones de CO₂ por el uso de cultivos perennes para la generación de energía son 7, 12 y 13 veces menores que las producidas por gas, petróleo y carbón, respectivamente” (Ma *et al.* 2000).

McLaughlin *et al.* (1996) estiman que un kilogramo de biomasa utilizado para la generación de electricidad contiene aproximadamente 18.5 GJ de energía.

De acuerdo con Pimentel y Patzek (2005), con una cosecha de 4 ton/acre/año de materia seca, el retorno energético por cada Kcal de energía fósil invertida es de 11 Kcal.

“Estudios pasados han reconocido los beneficios de la quema conjunta de biomasa con carbón, pero han calificado al proceso de inefectivo económicamente debido a los precios históricos bajos del carbón” (Khanna, 2008). Adicionalmente, Kumar (2007) establece que 1.6 toneladas de switchgrass equivalen al contenido calórico de 1 tonelada de carbón.

2.7 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Walsh (2000) desarrolla diferentes presupuestos operativos partiendo de un sistema de asignación utilizado previamente por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés). Los costos son agrupados de la siguiente manera:

Costos Variables: fertilizantes, herbicidas, semillas, reparación de maquinaria, combustible, lubricantes, mano de obra y cuerda.

Costos Fijos: impuestos y seguro, interés sobre el capital de operaciones y capital de trabajo.

Recursos propios: alquiler del terreno, gerencia y depreciación.

2.7.1 Costos de producción de switchgrass en Iowa

Brummer *et al.* (2000) trataron de identificar métodos de producción de switchgrass en el sur de Iowa que permitieran una viabilidad económica, realizando estudios en el Chariton Valley a través de siete diferentes escenarios y usando como factores variables el uso previo de la tierra, el costo de siembra, y la época de siembra.

La producción asumida fue entre 33.625 y 35.86 t/ha. Las prácticas operacionales seguían un programa de herbicidas básico (remover cualquier hoja ancha presente), no se usaron insecticidas y para los costos de maquinaria fueron utilizados los costos promedio de renta de maquinaria para el estado de Iowa. La información fue resumida en tres presupuestos uno para las actividades del año de establecimiento (maquinaria, fertilizante, semillas, renta del terreno y químicos), otro para las actividades de resiembra (el costo operacional de cada actividad multiplicado por la probabilidad de que esta ocurra) y los costos asociados con la producción anual (Costos operativos y de cosecha).

El presupuesto contempló la aplicación de fertilizante a granel en el año de establecimiento así como en los años de producción, a una tasa de 112 kg/ha de N, mientras que la cantidad aplicada de P y K dependía de la producción. También incluyeron el cargo anual por uso de la tierra y un interés anual sobre el dinero usado en la compra de los insumos variables. Los costos de establecimiento y siembra fueron prorrateados sobre once y diez años, respectivamente, a una tasa del 8% anual. La suma de los costos estimados de producción anual, en conjunto con los costos prorrateados de establecimiento y siembra, es dividida dentro del volumen total de la producción para obtener el costo estimado de producción por tonelada métrica de switchgrass (Nótese que éste estimado no incluye los costos de transporte una vez que las pacas son comercializadas con las refinерías).

Entre los resultados, mencionan como los costos más significantes en el año de establecimiento la aplicación de cal (CaO) y la compra de semillas sin embargo, entre los costos de producción anual destacan los asociados a fertilización y cosecha.

Un detalle importante es el hecho de que no se detectó ninguna correlación entre el tamaño del lote y el tiempo de cosecha, siendo constante el tiempo requerido, por hectárea, para segar y arar el suelo; mientras que, el tiempo para enfardar es una función de la cosecha, la cual es ajena al tamaño del campo y responde a otras causas como tasas de fertilización, cultivar usado, tiempo de cosecha y manejo.

Acerca de la producción y el costo por tonelada, fue descubierta una relación no lineal entre ambos; por tanto, a medida que se incrementa la producción se incrementa el costo por hectárea sin embargo, el costo por kilogramo decrece.

Como se pudo observar, aún cuando el estudio enmarca varias condiciones particulares, es posible señalar que en general, el costo por tonelada métrica de switchgrass en tierra cultivable, considerando subsoleo, siembra en primavera y un rendimiento promedio de 8.96 t/ha, es de USD\$ 158.14 y de USD\$ 61.77 los costos prorrateados del año de establecimiento.

De manera similar Duffy and Nanhou (2002) estiman los costos de producir switchgrass (para biomasa) en el sur de Iowa. Ellos proponen escenarios y condiciones similares a las expuestas en el estudio previo.

En su estudio muestran un amplio rango de resultados sin embargo, tomando como punto de partida el escenario que presenta mayor similitud a las condiciones de Carolina del Sur (tierra cultivable, subsoleo, siembra en primavera y rendimientos promedio de 8.96 t/ha) el costo prorrateado para el año de establecimiento fue de USD\$ 61.77/ha, mientras el costo de producción anual fue de USD\$ 60/t. Ambos resultados se acercan mucho a los valores propuestos por Brummer *et al.* (2000).

2.7.2 Costos de producción de switchgrass en Tennessee

Mooney *et al.* (2008) desarrollaron un estudio donde sometieron algunos costos de producción de switchgrass del oeste de Tennessee a un análisis de varianza para tratar de identificar alguna combinación de bajos costos entre porcentajes de siembra y de fertilización, en contraparte a las típicas tasas recomendadas de 67.25 kg/ha de N y 5.60 kg/ha de semillas.

Para estimar los costos de producción de switchgrass como cultivo bio-energético en el oeste de Tennessee, desarrollaron presupuestos operativos para el establecimiento, mantenimiento y cosecha anual del cultivo en cuatro diferentes escenarios.

Un calendario de maquinaria y mano de obra fue utilizado para visualizar las operaciones específicas de cada presupuesto. No se consideraron costos de resiembra, así como fertilizaciones con P y K.

El presupuesto operativo para el año de establecimiento consideró costos de semillas, herbicidas, fungicidas, maquinaria, y mano de obra. En el presupuesto de mantenimiento se incluyeron las aplicaciones de herbicidas, fungicidas y N, así como el uso de maquinaria y mano de obra. El presupuesto operativo para las actividades de cosecha incluyó todos los costos de maquinaria y mano de obra relacionados con segar, rastrillar, enfardar y almacenar.

Las fuentes de las que fueron tomados los precios de los insumos no aparecen, sin embargo los costos relacionados a maquinaria y mano de obra señalan como fuente el presupuesto de producción de Switchgrass de la Universidad de Tennessee, así como los costos de segar y rastrillar. La renta del terreno fue asumida de USD\$ 247/ha y el costo de capital se estableció específicamente para cada escenario.

Los resultados del estudio mostraron que entre condiciones de drenaje buenas a moderables, las cantidades de semilla usadas y los niveles de N no afectan significativamente los costos por producción de switchgrass. Sin embargo, en pobres condiciones de drenaje un decrecimiento en la cantidad de semilla usada en la siembra de 5.60 a 2.8 kg/ha junto a un incremento en la tasa de aplicación de nitrógeno de 67.25 a 134.5 kg/ha puede representar un decrecimiento de casi 10% en los costos de producción por kilogramo.

Aún cuando el estudio fue conducido asumiendo dos diferentes periodos de vida, cinco y diez años, solo se considero el segundo escenario por ser el más relevante para nuestro estudio. Al final se establecieron los costos de producción como un 50% atribuibles a costos de cosecha, 30% a costos de renta del terreno y 20% a costos de mantenimiento y establecimiento.

El tratamiento de bajo costo sugiere un costo promedio por tonelada métrica de USD\$ 60 para condiciones de pobre drenaje y de USD\$ 50 para condiciones de buen drenaje.

2.7.3 Costos de producción de switchgrass en el sureste de los Estados Unidos.

Kszos *et al.* (2002) sugieren una reducción de costos de producción a través de un incremento en la producción y optimización del manejo del cultivo. Para estructurar los costos utilizaron un modelo de contabilidad de costos (BIOCOST) que provee algunas variables predeterminadas de producción y prácticas de manejo.

La información de las variables predeterminadas fue cambiada usando datos de algunos proyectos de switchgrass desarrollados por el Instituto Politécnico de la Universidad Estatal de Virginia y la Universidad de Auburn.

El ensayo propuesto incluye una reducción de 50% en la tasa de aplicación de nitrógeno (112 kg/ha) con un mejoramiento en las prácticas de manejo que resulta en un decrecimiento del 10% en los costos de producción.

2.7.4 Resumen

El siguiente cuadro resume las estimaciones de costos, precios y rendimientos de la literatura citada anteriormente.

Cuadro 1 Resumen de estimaciones de costos, precios, producción y utilidad para los diferentes escenarios citados en la literatura.

Fuente Variables	Brumer <i>et al.</i> (2000) Iowa	Mooney, <i>et al.</i> (2008) Tennessee	Wilkes, <i>et al.</i> (2007) Mississippi
Costos de establecimiento/ha (USD \$)	425.29	548.10	1,144.00
Costos del segundo año/ha (USD \$)	269.29	ND	523.86
Costos de producción anual/ha (USD \$)	527.03	130.94	523.86
Producción esperada t/ha (cultivo maduro)	13.45	14.52	SD
Precio asumido/t (USD \$)	50.00	40.00	SD
Retorno neto/ha (USD \$)	112.38	509.55	SD

Fuente: Adaptado por el autor.

2.8 PRECIOS

Anteriormente se ha mencionado que la tecnología para la generación de bioenergía a partir de switchgrass aún no es viable comercialmente, lo que imposibilita la obtención de precio de mercado sin embargo, varios estudios han evaluado la rentabilidad de switchgrass utilizando como base algunos supuestos sobre su precio. Estos se citan a continuación.

Mooney *et al.* (2008) sugieren considerar el precio de equilibrio que se espera haría competitivo a switchgrass con maíz, como materia prima para la producción de etanol. Así, establecen un precio de USD\$ 44/t de switchgrass como el precio posible o ideal. Este precio fue tomado de una investigación previa (De la Torre Ugarte *et al.* 2003).

Bangsund *et al.* (2008) evalúan el precio de equilibrio en granja de switchgrass, como el precio requerido para cubrir sus costos de producción y proveer el mismo nivel de utilidad de otros cultivos tradicionales. El estudio propuesto utiliza un valor anualizado para los costos de producción y retornos netos de switchgrass y estima su precio de equilibrio en un rango entre los USD\$ 50.0 y los USD\$ 80.0 por tonelada métrica de materia seca.

Griffith *et al.* (2009) proponen la utilización de un precio comparativo, tomando como base el valor energético equivalente entre el etanol y la gasolina.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

Los materiales utilizados en el desarrollo del presente estudio son detallados a continuación:

- Microsoft Excel
- El paquete de herramientas de decisión de Palisade

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Desarrollo de presupuestos operativos

La cuantificación de los costos de operación para los primeros años de establecimiento del cultivo, así como para sus años de madurez, se llevo a cabo mediante la elaboración de presupuestos operativos estándar, siguiendo el formato utilizado en los presupuestos de switchgrass de las universidades de Iowa y Tennessee, y el empleado por la universidad de Clemson para cultivos tradicionales.

Siguiendo el ciclo de vida del cultivo y los presupuestos desarrollados para otros estados, se establecieron tres presupuestos operativos, uno para el año de establecimiento del cultivo, otro para su segundo año de establecimiento y un tercero para su etapa de madurez, bajo el supuesto de que a lo largo de ésta, su producción anual promedio es estable.

3.2.1.1 Estructura. A continuación se detalla la estructura de los presupuestos.

- Ingresos Brutos
- Costos variables: mantenimiento y reparación de maquinaria, combustibles y lubricantes, mano de obra, fertilizantes, herbicidas, cuerda (para los años de cosecha), semillas (para el año de establecimiento) y un interés sobre el capital operativo.
- Ingreso sobre costos variables

- Costos fijos: depreciación, impuestos, interés, seguro y garaje de maquinaria.
- Costos adicionales: renta de la tierra y misceláneos.
- Costos Totales
- Retorno neto a la gerencia y riesgo.

Los presupuestos no consideraron los costos involucrados con la gerencia del agricultor, así como el riesgo involucrado con la actividad.

Para los presupuestos de los primeros dos años de establecimiento, durante los cuales no hay producción o es mínima, se prorrataron sus costos o ingresos netos entre los años de madurez del cultivo. Para ello, se utilizó una tasa del 7%, tomada de los presupuestos desarrollados por la Universidad de Tennessee (2008).

3.2.1.2 Ingresos Brutos. Los ingresos brutos se estimaron como el producto de la producción anual (en toneladas métricas de materia seca) y el precio en granja de switchgrass (USD\$ por tonelada métrica de materia seca).

No se consideró ninguna producción durante el año de establecimiento, debido a que los altos costos de cosecha y la baja producción no justifican cosechar el cultivo. Para el segundo año de producción se asumió una producción de 7.84/t/ha de materia seca y para los años de madurez del cultivo (se estima que del año 3 al 10 la producción promedio anual es estable) se asumió una producción de 15.96/t/ha de materia seca. El sistema de cosecha considerado es de una práctica anual, realizada a finales de Noviembre, una vez que ha tenido lugar el proceso de senescencia en la planta. Los rendimientos estimados de producción fueron provistos por el Centro de Investigación Pee Dee de la universidad de Clemson (2009).

Se utilizó como referencia un precio en granja de USD \$ 66/t de materia seca de switchgrass. Este precio es actualmente ofertado a los agricultores de Carolina del Sur por la planta procesadora Carolina Pacific, la cual produce y exporta pellets y bloques de switchgrass al mercado Europeo.

3.2.1.3 Costos Variables. El estudio asume un único año de siembra, a una tasa de aplicación de 6.72 kg/ha de semillas, de acuerdo a lo propuesto por los presupuestos de Tennessee (2008).

La información referente al tipo de maquinaria a utilizar, su valor de compra, valor residual, horas de vida útil y eficiencia en campo, fue obtenida de los presupuestos de switchgrass desarrollados por la universidad de Tennessee (2008), English *et al.* (2009) y el sistema generador de presupuestos de la universidad de Clemson.

La obtención de los costos por combustible se desarrolló en función del tipo de motor y de la potencia de éste, como resultado de un ajuste sobre los factores de conversión descritos por Kay *et al.* (2004) quienes describen que el consumo de combustible en gal/h para los motores de tipo diesel equivale al producto de su potencia (expresada en caballos de fuerza) y un factor de 0.044, mientras que para un motor de gasolina su consumo corresponde al producto de su potencia y un factor de 0.06. Así, se ajustaron dichos factores de modo que el consumo de diesel en l/h es el producto de la potencia del motor (hp) y un factor de 0.012, y un factor de 0.016 para gasolina.

Los costos de lubricantes por hora han sido establecidos por Kay *et al.* (2004) como un 10% de los costos por combustibles por hora.

Los costos de mantenimiento y reparación de la maquinaria se obtuvieron a través de la tasa de mantenimiento acumulado, que se expresa como porcentaje del valor de compra de la maquinaria y que establece los costos involucrados con el mantenimiento y la reparación de cada equipo a lo largo de su vida útil. Estas tasas se obtuvieron de los presupuestos de las universidades de Clemson y Tennessee (2008). El costo de mantenimiento por hora, se estima como el producto de la tasa y el valor de compra de la maquinaria, divididos para el total de horas de vida útil de la maquinaria.

El costo por hora de mano de obra fue tomado del documento “Datos sobre la Producción Agrícola en Carolina del Sur” (2009), donde se establece de USD\$ 10/h.

El tiempo empleado por cada maquinaria en una hectárea, se estableció con base en los supuestos de Kay *et al.* (2004), como el producto del ancho de cada equipo (m), su velocidad (km/h), y su eficiencia en campo (5). Adicionalmente se utilizó un factor de conversión de metros a hectárea.

El programa de fertilización asumido en el estudio comprende la aplicación de P y K en las formas de P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Las aplicaciones durante el año de establecimiento del cultivo, así como para sus años de madurez, son de 44.83 kg/ha de P y 89.66 kg/ha de K. Durante el segundo año, la aplicación de ambos nutrientes es nula, ya que al no desarrollarse ninguna cosecha en el año de establecimiento, no se dieron pérdidas de nutrientes. Los costos estimados son de USD\$ 1.32/kg de P_2O_5 y USD\$ 0.70/kg de K_2O . En cuanto al N, se asume que la aplicación es nula durante el año de establecimiento, para reducir la competencia con malezas, y que para el segundo año y los años de madurez será de 67.25 kg/ha, a un costo de USD\$ 1.14/kg. Los precios y tasas de aplicación fueron tomados de los presupuestos de la universidad de Tennessee (2008) y ciertas especificaciones proporcionadas por el Dr. Jim Frederick del Centro de Investigación Pee Dee de la Universidad de Clemson.

El programa de herbicidas contemplado por el estudio involucra tres aplicaciones de herbicidas pos-emergentes durante el año de establecimiento y una aplicación para el segundo año, para un control efectivo de malezas. Las tasas de aplicación de herbicidas, así como sus costos, fueron tomados de los presupuestos de la universidad de Tennessee

(2008) y ciertas especificaciones proporcionadas por el Dr. Jim Frederick del Centro de Investigación Pee Dee de la universidad de Clemson.

Con relación a la cosecha, se contempló el uso de un rollo de cuerda por paca de switchgrass cosechada, asumiendo pacas de 3,306.93 kg, el costo de cada rollo se estimó en USD\$ 1.49, de acuerdo a los presupuestos desarrollados por la Universidad de Tennessee (2008). Finalmente, para la estimación del interés sobre el capital operativo se aplicó una tasa del 7%, la cual fue tomada de los presupuestos de switchgrass para Tennessee (2008).

3.2.1.4 Costos Fijos. La obtención de los costos por impuestos, seguro y garaje (ISG) para la maquinaria se desarrolló mediante la tasa establecida por Kay *et al.* (2004), quienes estipulan que los costos totales de ISG para la vida útil de la maquinaria corresponden a un 2% de su valor de compra. Así, dicha tasa fue multiplicada por el valor de compra de cada maquinaria y posteriormente dividida entre el número de horas anuales de uso de la maquinaria, para obtener los costos totales de ISG por maquinaria-por año.

El costo de interés por hora de la maquinaria, fue estimado como el cociente del valor de compra promedio de la maquinaria y sus horas totales de vida útil, multiplicado por una tasa del 7%. Esta tasa fue tomada de Kay *et al.* (2004).

El costo de depreciación por hora para cada maquinaria se estableció como el cociente del valor neto de cada equipo y su número de horas de vida útil, de acuerdo a lo establecido por Kay *et al.* (2004)

3.2.1.5 Costos adicionales. El costo de renta de la tierra fue considerado de USD\$ 62/ha, mientras que el costo de capital de trabajo fue determinado como el producto de los costos variables y una tasa del 9%. Estos valores fueron tomados del sistema generador de presupuestos de la Universidad de Clemson (2009).

3.2.2 Presupuesto de Capital

El presupuesto de capital se desarrolló para un período de diez años, asumiendo costos e ingresos constantes del tercer al décimo año. Los costos e ingresos por kilogramo por hectárea, fueron tomados de los presupuestos operativos desarrollados anteriormente. Los costos de producción anual se estipularon en tres categorías, como ser: materiales, maquinaria y mano de obra. La tasa de descuento utilizada para traer los flujos netos de efectivo a valor presente fue de un 7%, siguiendo los lineamientos de los presupuestos de la Universidad de Tennessee (2008).

3.2.3 Generador de presupuestos de switchgrass

El estudio contempló el desarrollo de una hoja de trabajo de Excel para la generación de presupuestos operativos y de capital para el cultivo de switchgrass. La hoja de trabajo fue

creada mediante la programación de las fórmulas anteriormente descritas utilizando diferentes funciones de Excel. Se contempló cierta holgura en el funcionamiento del programa, a fin de que las variables de entrada (precios, tasas de aplicación, información del equipo y materiales, etc.) pudieran ser adaptadas a condiciones diferentes.

La hoja de cálculo se segmentó en tres secciones, la primera comprende cierta información general acerca del funcionamiento y las limitantes de la hoja de cálculo, la segunda sección hace referencia al ingreso de información y la tercera sección resume los diferentes resultados obtenidos a través de la hoja como ser, los presupuestos operativos, el presupuesto de capital y el resumen del consumo energético de combustible generado por la actividad productiva.

3.2.4 Análisis de riesgo

El análisis de riesgo consistió en:

- La identificación de las variables de decisión involucradas en la producción anual de switchgrass
- Obtención de registros históricos de datos para cada una de las variables.
- El desarrollo de distribuciones de probabilidad para cada una de las variables de decisión, utilizando la herramienta @Risk proporcionada por el paquete de herramientas de decisión de Palisade.
- El establecimiento de una ecuación que permitiera calcular la utilidad anual de una hectárea de switchgrass.
- El desarrollo de un modelo de simulación Montecarlo a través de la herramienta @Risk.

3.2.4.1 Variables de decisión. El presente estudio, contempló como variables al precio posible que switchgrass podría obtener en el mercado, así como a los precios de los dos principales insumos en la estructura de costos de los presupuestos, como ser nitrógeno y diesel. La producción no se contempló como una variable, debido a la inexistencia de valores históricos que limitaban el establecimiento de una distribución de probabilidad para sus valores.

Así, las variables de decisión consideradas fueron:

- El precio del N (USD\$/kg); por ser el insumo de mayor peso en los costos variables y debido a la alta fluctuación en sus precios.
- El precio del combustible diesel (USD/\$); los equipos agrícolas considerados en este estudio tienen un motor diesel
- El precio en granja de switchgrass (USD\$/kg); se asumen tres diferentes escenarios.

3.2.4.2 Datos utilizados. Para los precios de Diesel, se obtuvo información de precios promedio anuales desde 1994 hasta 2008 del estado de Virginia, el cual comparte ciertas similitudes en precio con Carolina del Sur. Los datos fueron llevados a precios reales utilizando el IPC de la primera mitad del año 2009 publicado por el Departamento de Trabajo de los Estados Unidos. Los precios históricos fueron obtenidos del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés).

En el caso de N, se tuvo acceso a precios promedio anuales por tonelada de Urea (45% N) desde 1960 hasta el 2008. Estos precios fueron convertidos a precios por kilogramo de N, y posteriormente anualizados utilizando nuevamente el IPC de la primera mitad del año 2009. Los precios fueron obtenidos del Servicio de Estadísticas Agrícolas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés).

El precio en granja por kilogramo de switchgrass, se contemplo bajo los siguientes escenarios:

El primer escenario asume un precio en granja fijo de USD\$ 66/t de materia seca de switchgrass, bajo la asunción de que se establece un contrato con la planta procesadora de Carolina Pacific (localizada en Carolina del Sur), para la elaboración de pellets y bloques de exportación al mercado Europeo.

El segundo escenario asume que switchgrass será comercializado como materia prima para la elaboración de etanol. Así, partiendo del procedimiento descrito por Griffith *et al.* (2009), se utilizaron precios históricos de gasolina por millón de kJ para establecer precios por tonelada métrica de materia seca de switchgrass, a través de equivalencias entre el valor energético que puede generar switchgrass como etanol y el valor energético de la gasolina. Para esto se asume que un kilogramo de switchgrass puede generar un rendimiento neto de 0.18 litros de etanol, siendo el valor energético de cada litro de etanol de 21,212.76 kJ, mientras que la gasolina genera 34,610.29 kJ/l. De esta manera, se estableció que un kilogramo de switchgrass tiene un equivalente de 3,818.19 kJ. Los precios utilizados, correspondían a precios de gasolina regular en el estado de Carolina del Sur desde 1983 hasta el 2009, los mismos fueron llevados a términos reales con el IPC de la primera mitad del año 2009. Los datos fueron tomados del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés).

El tercer escenario considera que switchgrass será comercializado como materia prima para la generación de electricidad. En este caso, se utilizaron los precios históricos de carbón para crear precios equivalentes para switchgrass mediante la comparación entre el valor energético de ambos. Kumar (2007) establece que 1.56 kilogramos de switchgrass equivalen al valor energético contenido en 1 kilogramo de carbón. Así, utilizando este factor de conversión se obtuvo la serie de precios equivalentes para switchgrass. Los precios de carbón se obtuvieron en una serie de precios promedio anuales desde 1970 hasta el 2008 tomada del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés). Los precios fueron llevados a precios reales utilizando el IPC de la primera mitad del 2009.

3.2.4.3 Establecimiento de los diferentes escenarios. Es necesario rescatar que a través de series de tiempo construidas para los datos históricos de cada una de las variables de decisión, fue posible identificar un cambio estructural en la tendencia de los datos, aproximadamente a partir del año 2003 (véase el anexo 1,2 y 3). El estudio supone que la causa de éste cambio estructural tiene su origen en el incremento que sufrieron los precios de los combustibles tras la ocupación estadounidense en Irak, la cual se inició en Marzo de 2003. Por tanto, al construir distribuciones de probabilidad sobre la serie de datos histórica, no se incluía adecuadamente el impacto de esta nueva tendencia en los precios, por lo que se desarrolló una segunda serie de datos históricos que incorporase este último cambio estructural.

La primera serie de datos no fue alterada, constituyendo la base para la creación de una primera distribución de probabilidad. Sin embargo, se construyó una segunda serie de datos para cada una de las variables, mediante la separación del componente estocástico para cada uno de los datos observados ($\hat{\epsilon}_i = X_i - \bar{X}$) y su consecuente ajuste utilizando la media de los valores observados entre los años 2003 a 2009. Así, se obtuvieron los siguientes escenarios:

Escenario 1.

1.1

Variable 1: Precio en granja fijo de switchgrass

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel USD\$/l)

1.2

Variable 1: Precio en granja fijo de switchgrass

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno, con media aritmética ajustada (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel, con media aritmética ajustada USD\$/l)

Escenario 2.

2.1

Variable 1: Precios simulados para switchgrass a través de su equivalencia energética con el carbón (USD\$/t)

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel USD\$/l)

2.2

Variable 1: Precios simulados para switchgrass a través de su equivalencia energética con el carbón, con media aritmética ajustada (USD\$/t)

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno, con media aritmética ajustada (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel, con media aritmética ajustada USD\$/l)

Escenario 3.

3.1

Variable 1: Precios simulados para switchgrass a través de su equivalencia energética con la gasolina (USD\$/t)

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel USD\$/l)

3.2

Variable 1: Precios simulados para switchgrass a través de su equivalencia energética con la gasolina, con media aritmética ajustada (USD\$/t)

Variable 2: Precios simulados para nitrógeno, con media aritmética ajustada (USD\$/kg)

Variable 3: Precios simulados para diesel, con media aritmética ajustada USD\$/l)

3.2.4.4 Desarrollo de distribuciones de probabilidad para cada una de las variables.

El desarrollo de las distribuciones de probabilidad para cada una de las variables de decisión se llevo a cabo mediante la utilización de la opción “ajustar distribución” proporcionada por la herramienta @Risk del paquete de herramientas de decisión de Palisade.

El programa utiliza una prueba de Chi-cuadrado para seleccionar la distribución que se ajusta mejor a la serie de datos seleccionada.

3.2.4.5 Desarrollo de una ecuación para la estimación de la utilidad por acre de switchgrass. Para el desarrollo de la ecuación se utilizó como referencia la desarrollada por Griffith *et al.* (2009), a la cual se le realizaron algunos ajustes para las condiciones particulares del estudio. La ecuación es la siguiente:

$$RN = PSC \cdot PS - [CN \cdot PSN + CC \cdot PSCo + OCV + DMI + CMO + RT + (CN \cdot PSN + CC \cdot PSCo + OCV + CMO) \cdot ICO \cdot 0.5]$$

Donde:

RN= Utilidad neta por acre cultivado de switchgrass

PSC= Precio simulado del cultivo

PS= Producción de switchgrass

CN= Cantidad aplicada de N

PSN= Precios simulados de N

CC= Cantidad de Combustible

PSCo= Precios simulados de combustible

OCV= Otros costos variables (P, K, cuerda, lubricantes, reparación de maquinaria)

DMI= Costos por depreciación, interés, seguro, impuestos y garaje de maquinaria.

CMO= Costos de mano de obra.

RT= Costo por renta del terreno

ICO= Interés sobre capital de operación (éste es multiplicado por 0.5, ya que se utiliza únicamente la mitad del año)

3.2.4.6 Desarrollo de un modelo de simulación Montecarlo. Una vez generadas las distribuciones de probabilidad para cada una de las variables y tras haber establecido la ecuación de utilidad para el modelo, se utilizó @Risk para poder correr un Modelo de Simulación Montecarlo. Para esto, se establecieron las variables de decisión como variables de entrada del modelo y se introdujo la ecuación de utilidad, designando como la variable de salida a la utilidad neta obtenida por hectárea cultivada de switchgrass. También fue necesaria la introducción del resto de las variables de la fórmula en el modelo de Excel.

Una vez establecidas las variables de entrada y salida se utilizó la función de “correr simulación” de @Risk, bajo un escenario de 1000 iteraciones. Este proceso se repitió seis veces, en función de los dos supuestos, para cada uno de los tres diferentes escenarios.

4. RESULTADOS

4.1 PRESUPUESTOS OPERATIVOS

A través de los presupuestos operativos fue posible el desarrollo de cuadros resumen de costos, para cada una de las etapas del ciclo productivo del cultivo, estos se muestran a continuación.

Cuadro 2. Costos para el primer año de establecimiento (USD\$/ha)

Operación	Costo por Materiales	Costo por Equipo	Costo por mano de obra	Costos Totales
Preparación del terreno	0.00	55.11	11.75	66.86
Siembra	296.53	25.49	4.27	326.28
Control de malezas	39.29	11.39	2.27	52.96
Fertilización	122.56	19.77	4.31	146.65
Renta del terreno	61.78	0.00	0.00	61.78
Capital de trabajo e interés	50.51	0.00	0.00	50.51
Costo Total	570.67	111.76	22.60	705.04

Como se observa en el cuadro anterior, los costos más significativos durante el primer año de establecimiento de switchgrass son aquellos relacionados con las actividades de siembra y fertilización

Cuadro 3. Costos para el segundo año de establecimiento (USD\$ /ha)

Operación	Costo por Materiales	Costo por Equipo	Costo por mano de obra	Costos Totales
Control de malezas	4.70	3.80	0.76	9.25
Fertilización	77.10	3.80	0.76	81.65
Cosecha	17.18	233.15	41.74	292.08
Renta del Terreno	61.78	0.00	0.00	61.78
Capital de trabajo e interés	25.74	0.00	0.00	25.74
Costo Total	186.49	240.75	43.26	470.50

En el segundo año de establecimiento, se hace evidente el impacto de las actividades de cosecha (mayormente combustibles) y fertilización (mayormente nitrógeno) en la estructura de costos.

Cuadro 4. Costos anuales de producción, del tercer al décimo año, (USD\$ /ha)

Operación	Costo por Materiales	Costo por Equipo	Costo por mano de obra	Costos Totales
Control de malezas	0.00	0.00	0.00	0.00
Fertilización	199.66	23.57	5.07	228.30
Cosecha	34.36	406.96	70.28	511.61
Renta del Terreno	61.78	0.00	0.00	61.78
Capital de trabajo e interés	50.99	0.00	0.00	50.99
Costo Total	346.79	430.53	75.35	852.68

Finalmente, los costos de producción anual, para la etapa de madurez del cultivo, se estiman en USD\$ 852.68 por hectárea, siendo estos mayormente representados por los costos de maquinaria en la cosecha y los costos de nitrógeno en las actividades de fertilización.

Los retornos netos fueron de USD\$ 68.88 para los años de madurez. Los flujos netos de los primeros dos años de establecimiento fueron prorrateados entre los años de madurez.

4.2 PRESUPUESTO DE CAPITAL

El presupuesto de capital fue elaborado sobre una línea de diez años, los resultados se presentan a continuación.

El valor actual neto de una hectárea de switchgrass, a los diez años de establecimiento, bajo un sistema de una única cosecha para producción de biomasa, en Carolina del Sur y a un costo de capital de 7% es de USD\$ 303.01.

Otro factor importante es el hecho de que los flujos netos de efectivo son positivos a partir del segundo año de establecimiento sin embargo, el periodo de recuperación de la inversión es de siete años.

Así mismo, la TIR del proyecto se estimo en un 8%. Este presupuesto no incluyó costo de gerencia ni riesgo. Los resultados se detallan en el Anexo 4.

4.3 CONSUMO DE ENERGÍA

Mediante las horas anuales de maquinaria, se estimo el consumo de energía por combustibles en la producción anual de una hectárea de switchgrass en Carolina del Sur,

en un sistema de una única cosecha, en 2, 683,200.47 kJ, requiriéndose de 107,904.48 kJ para producir una tonelada métrica. Para esto se utilizaron factores de conversión, tomados de la Oficina de Administración de Energía de los Estados Unidos.

4.4 ANÁLISIS DE RIESGO

4.4.1 Distribuciones de las variables de decisión

Como resultado del comando “ajustar distribución”, se obtuvieron los siguientes resultados para las diferentes variables.

Precios de switchgrass.

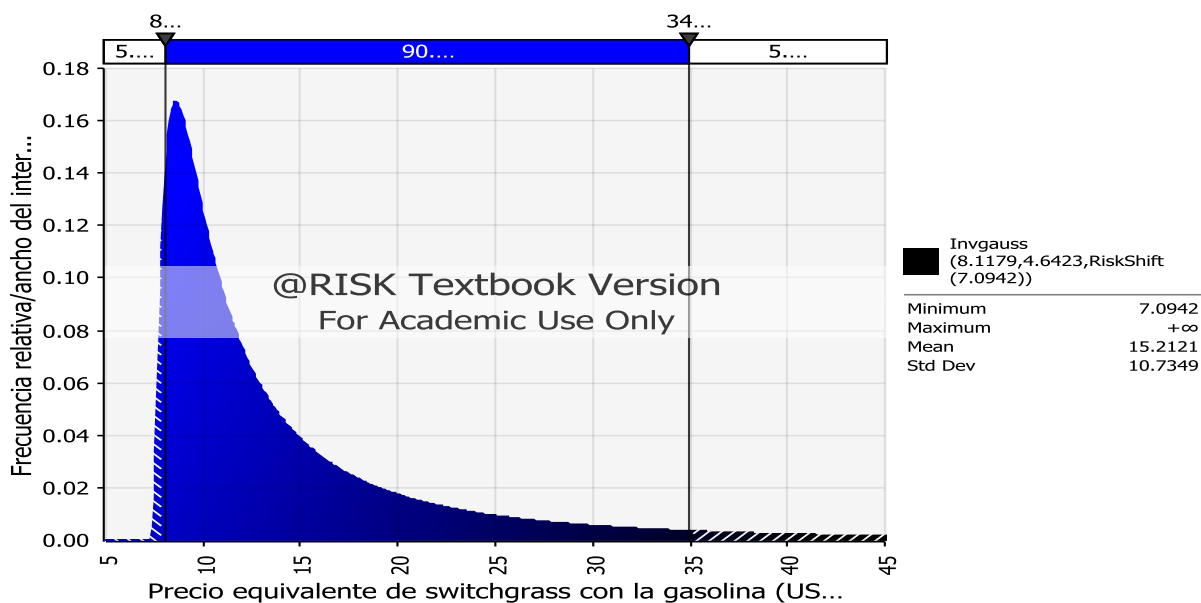


Figura 4. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de etanol (USD\$/t).

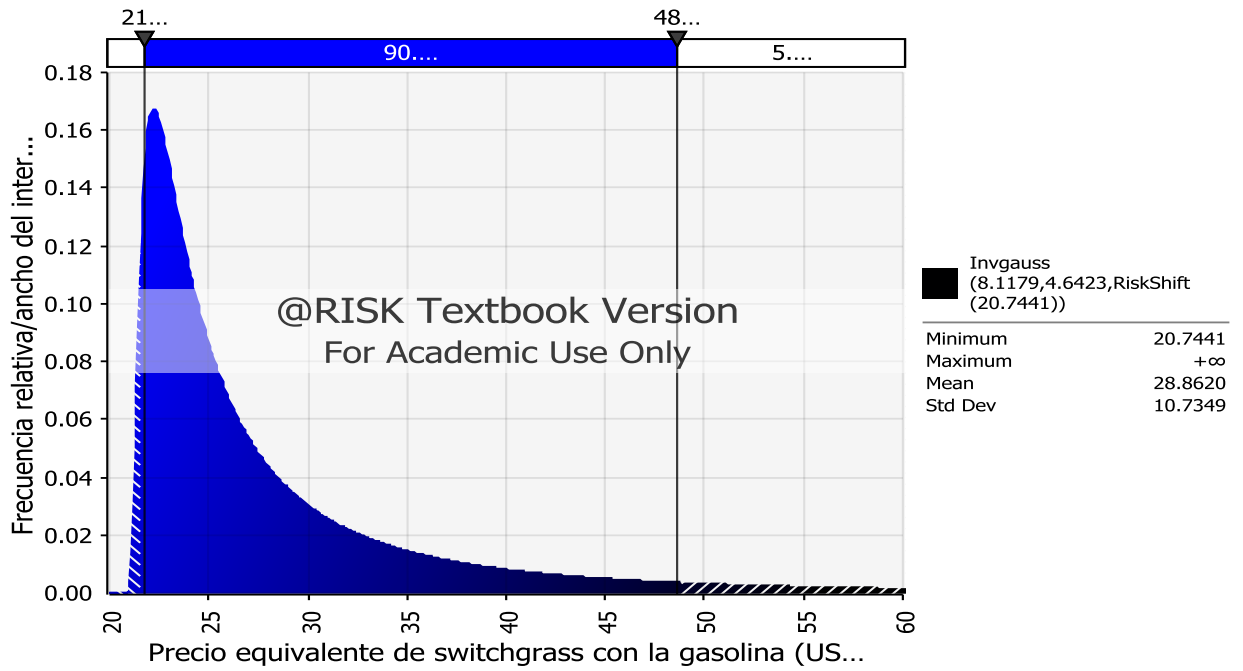


Figura 5. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de etanol (USD\$/t). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2009.

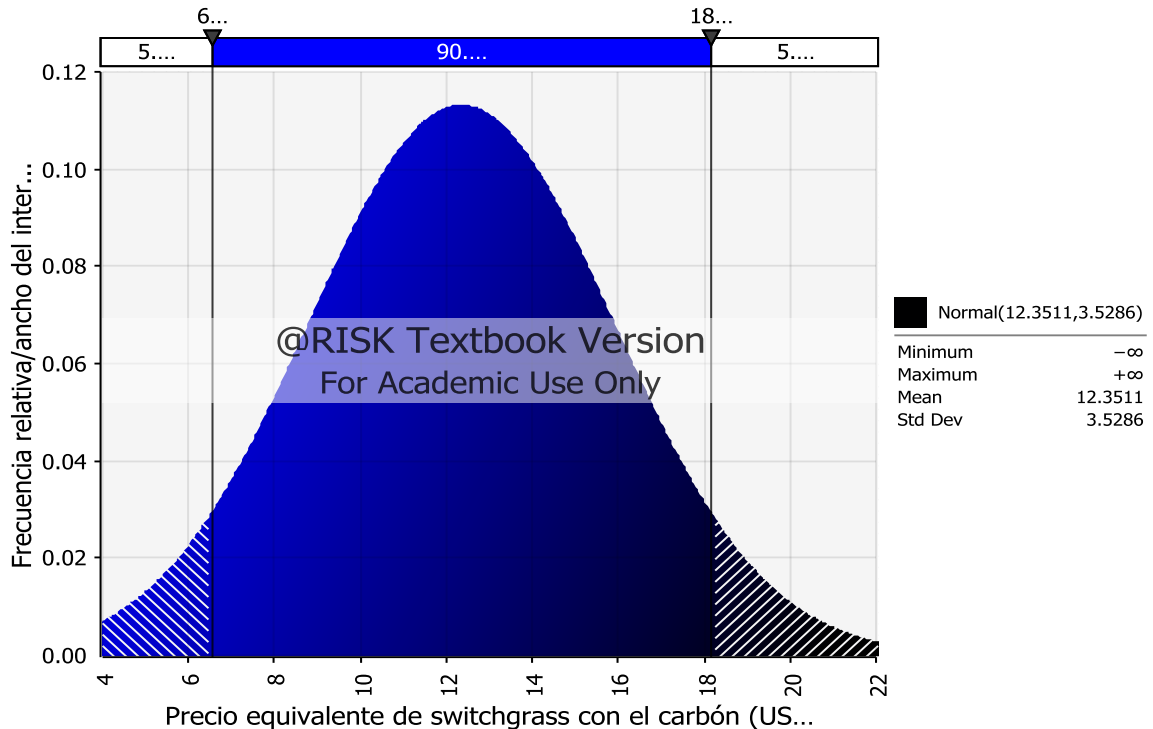


Figura 6. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de switchgrass al ser comercializado como materia prima para la producción de biopoder (USD\$/t). Puede observarse que en el caso de la serie de precios de switchgrass para etanol, la distribución ajustada posee una media aritmética mayor a la de la distribución de los datos originales, como resultado del ajuste a los cambios estructurales.

Precio de Nitrógeno

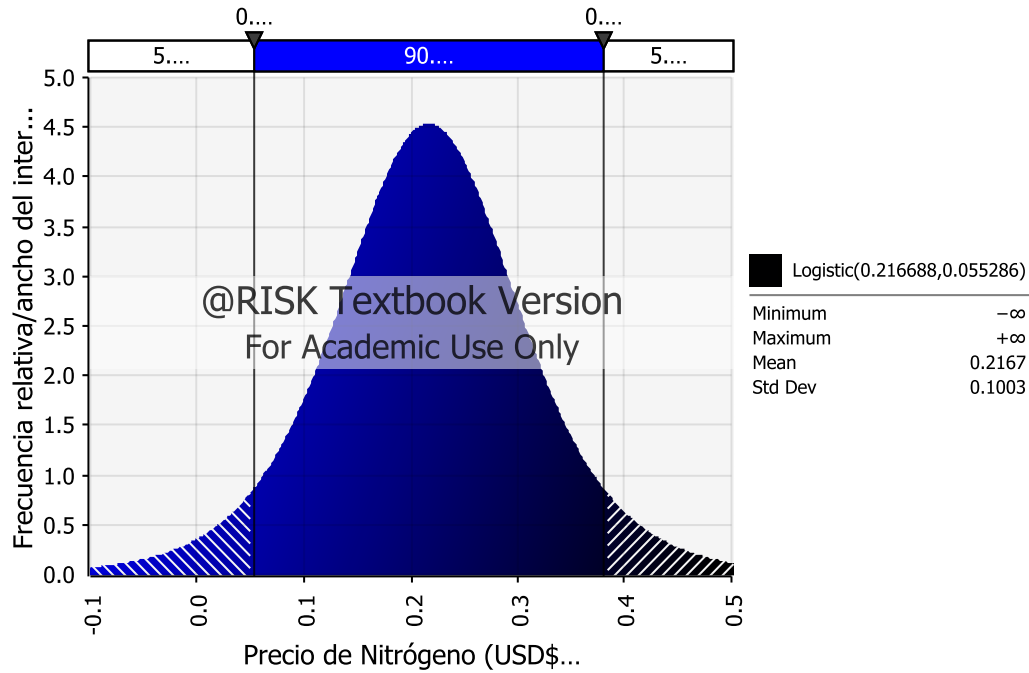


Figura 7. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de nitrógeno (USD\$/kg).

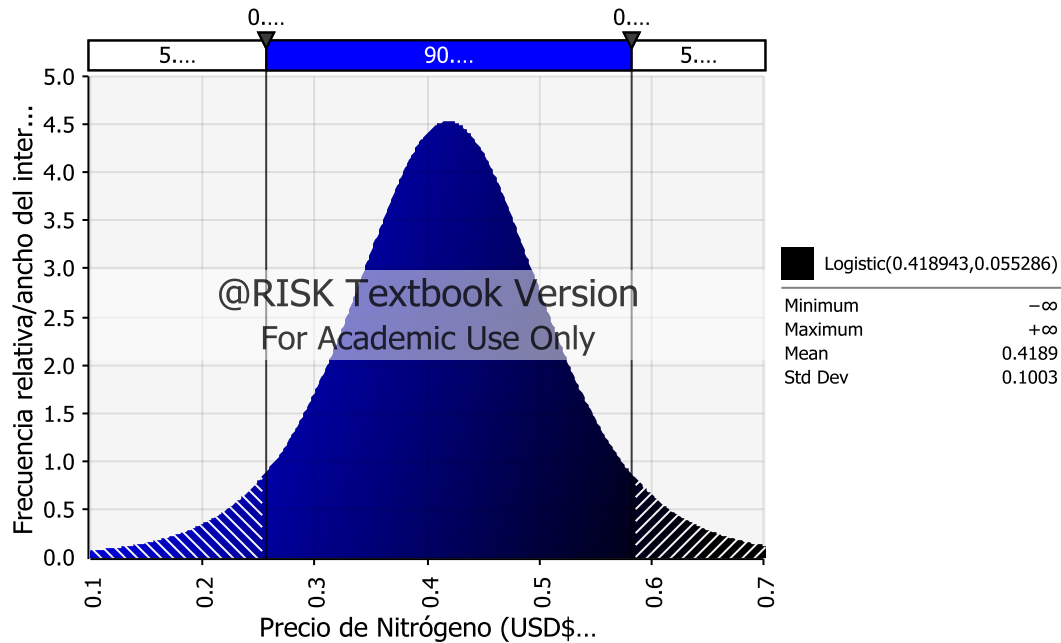


Figura 8. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales -de nitrógeno (USD\$/kg). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2008.

Puede observarse nuevamente una diferencia en la media aritmética de ambas distribuciones, donde la segunda distribución ha sido desplazada hacia la derecha, donde encuentra valores más altos, en respuesta a la tendencia existente del incremento de los precios.

Precio de Diesel

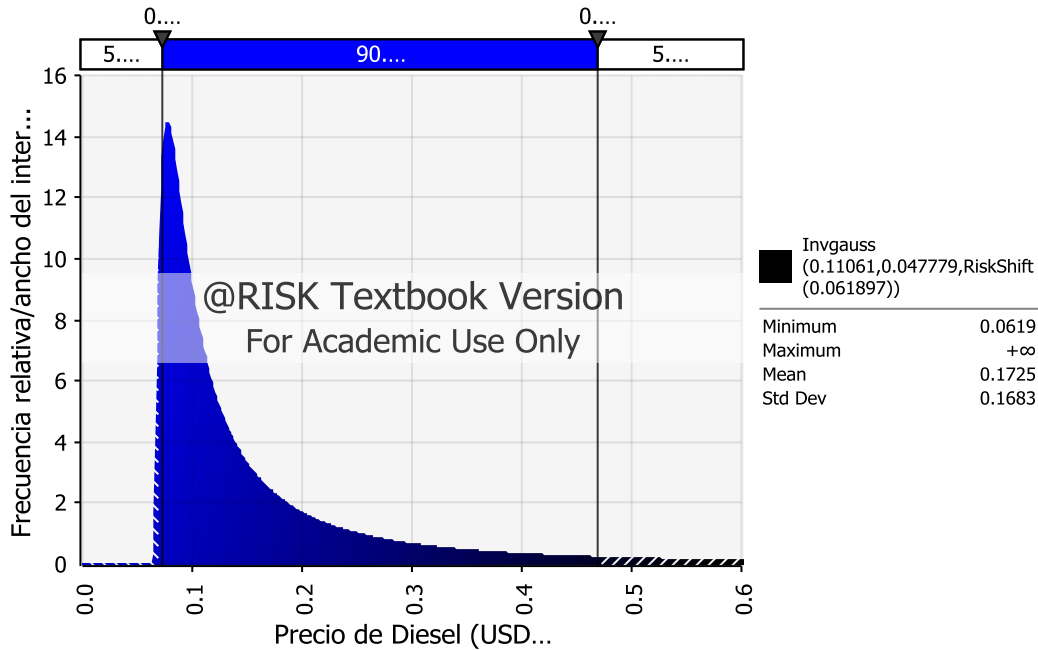


Figura 9. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de diesel (\$/l).

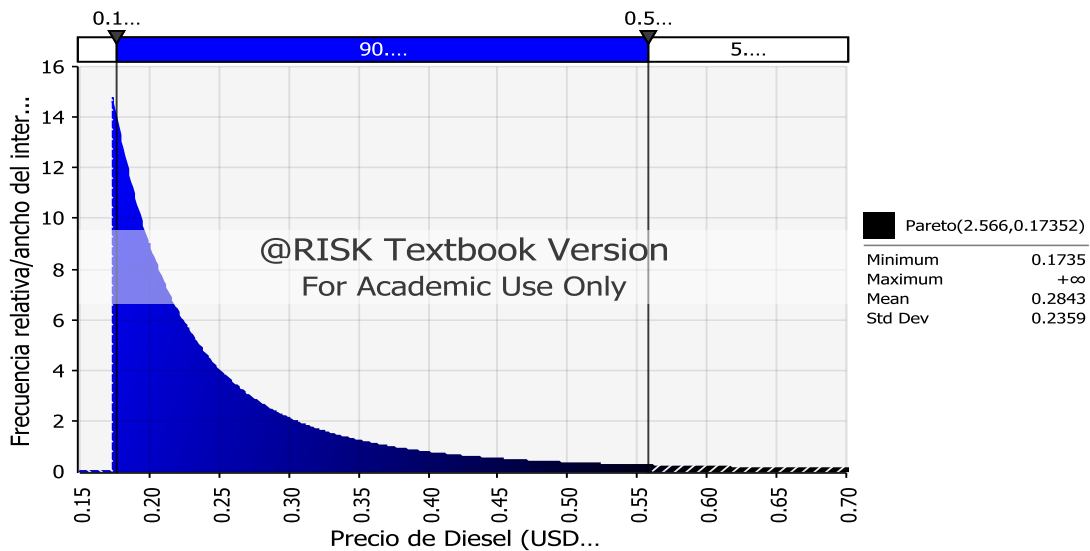


Figura 10. Distribución de probabilidad de densidad para los precios reales de diesel (\$/l). La media aritmética ha sido ajustada utilizando los precios reales del 2003 al 2009.

4.4.2 Resultados de la simulación Montecarlo.

Primer escenario.

Este escenario asume un precio fijo en granja para switchgrass de USD\$ 66/t y precios variables para el nitrógeno y el diesel. En este escenario los datos no se ajustan por el cambio estructural.

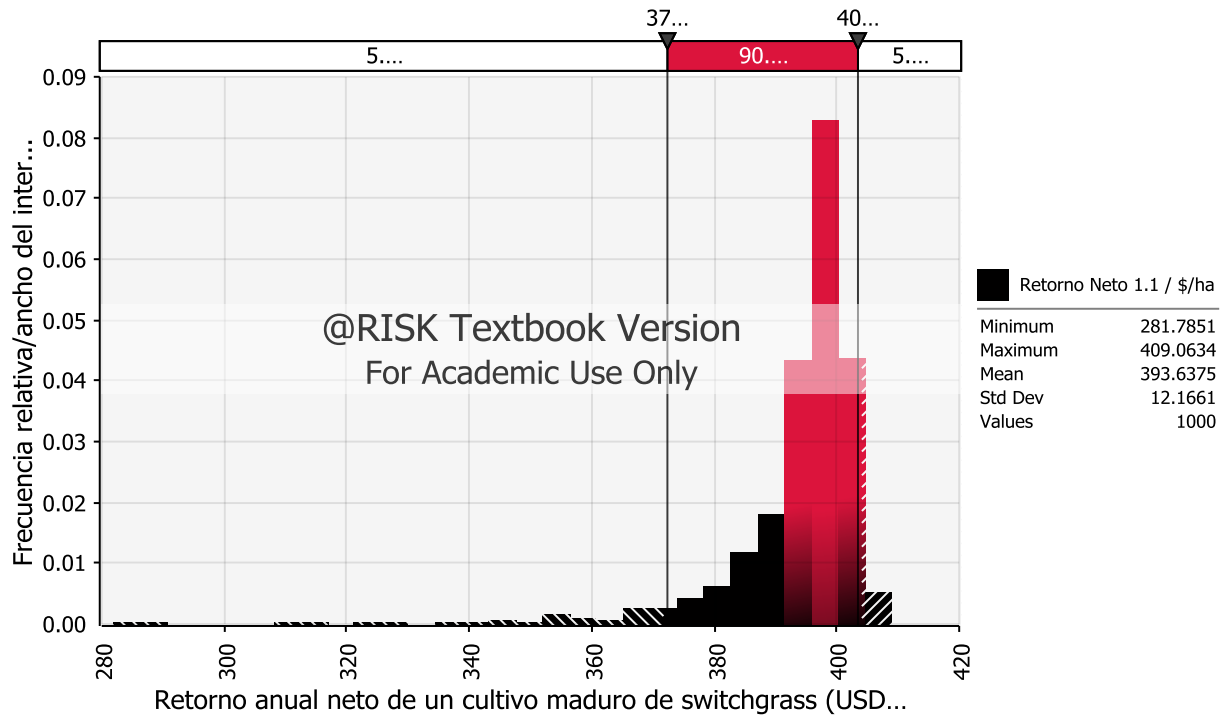


Figura 11. Distribución de probabilidad de densidad para la utilidad anual en USD\$ por hectárea cultivada de switchgrass.

Como puede observarse en la Figura anterior, existe una probabilidad de un 90 % de obtener retornos anuales por hectárea cultivada de switchgrass, entre los USD\$ 372.5 y USD\$ 403.4. De igual manera, existe una probabilidad inferior al 5% de que dichos retornos sean negativos. Este escenario se presume para los años de madurez del cultivo.

La Figura 12 muestra la distribución probabilística de densidad de la utilidad anual de switchgrass, asumiendo un precio fijo en granja de USD\$ 60/t y precios variables para el nitrógeno y el diesel. La media aritmética de los datos ha sido ajustada, a manera de incluir el cambio estructural.

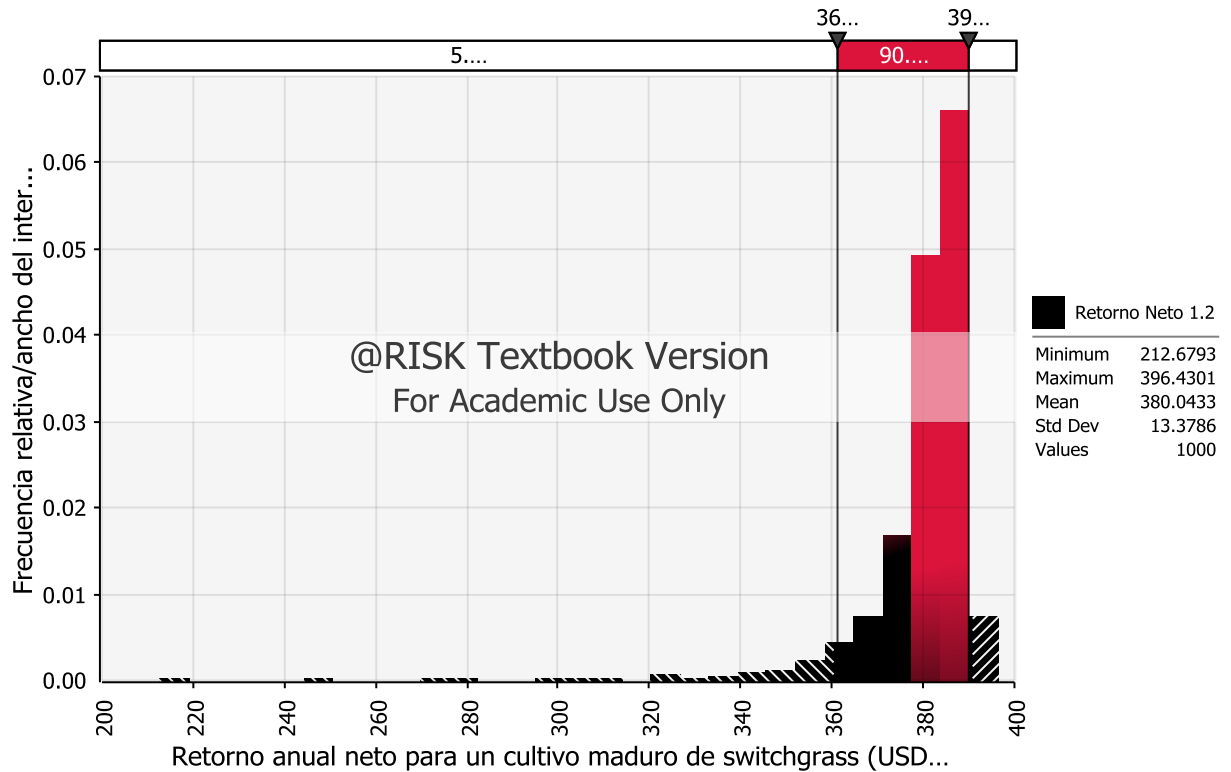


Figura 12. Distribución de probabilidad para la utilidad anual en USD\$, por hectárea de switchgrass. Distribución con media aritmética ajustada utilizando precios reales del 2003 al 2009 para las variables de precio de nitrógeno y diesel.

Puede observarse que al asumir una media ajustada por la tendencia creciente en los precios de diesel y nitrógeno, la probabilidad de obtener retornos netos positivos se reduce, aunque el cambio no es significativo. El estudio sugiere una probabilidad de un 90% de obtener retornos de efectivo entre 361 y 390 USD\$ durante los años de madurez del cultivo.

Segundo escenario.

Se presume precio variable por tonelada métrica de switchgrass, como materia prima para la generación de biopoder, así como precios variables de nitrógeno y diesel.

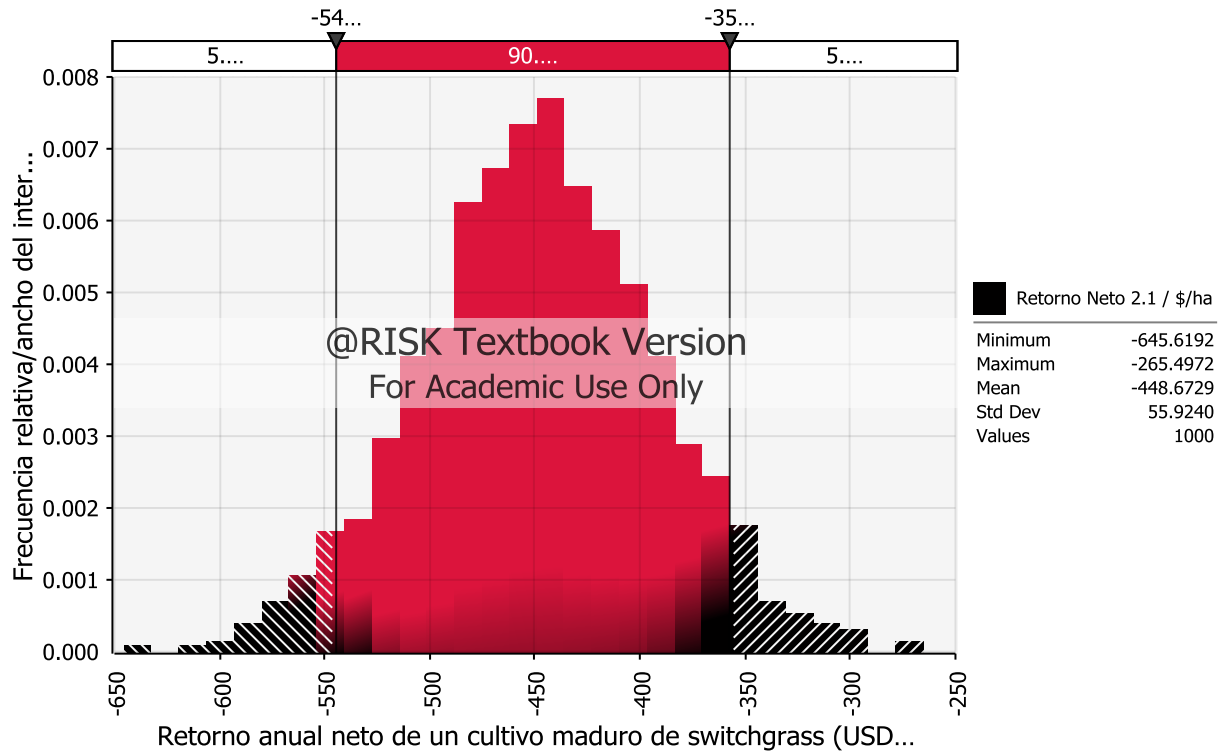


Figura 13. Distribución de retornos netos simulados en USD\$, para una hectárea de switchgrass cultivada como materia prima para la generación de biopoder.

Como se observa en el Figura13, los rendimientos netos en este escenario son eminentemente negativos, con una probabilidad menor al 5% de obtener retornos positivos. El gráfico para el supuesto de precios ajustados no se presenta, ya que al asumir precios aún más altos para los costos, generó retornos aún más negativos. Estos resultados encuentran su explicación en los precios bajos del carbón, de los cuales se desarrollo la equivalencia para encontrar los precios de switchgrass.

Tercer escenario.

Se asume precio variable por tonelada métrica de switchgrass, comercializada como materia prima para la producción de etanol. También, se presumen precios variables para los costos de nitrógeno y diesel.

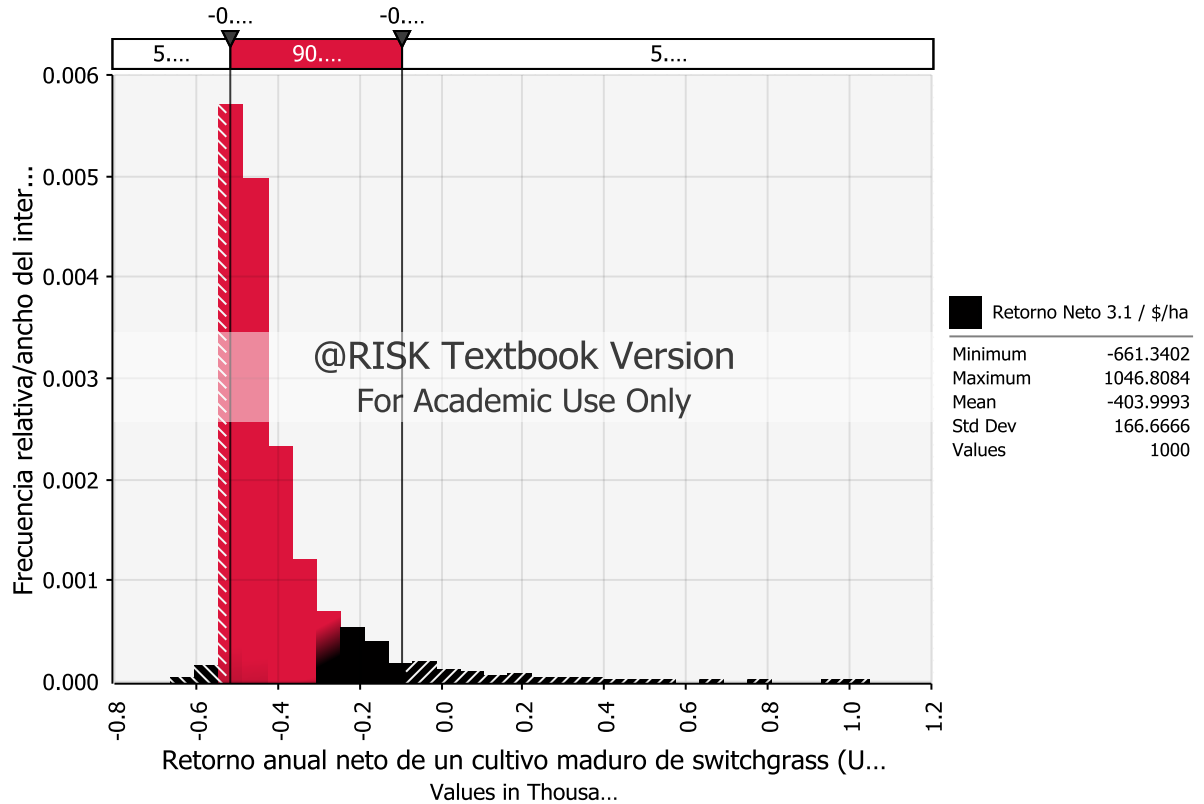


Figura 14. Distribución de probabilidad para los retornos simulados de switchgrass en USD\$/ha, asumiendo que se comercializa como materia prima para la producción de etanol.

La Figura 14 señala una probabilidad menor al 5% de obtener retornos positivos, por lo que no se ahondará más en este escenario. No obstante, el estudio concluye que la explicación a los retornos negativos en el segundo y tercer escenario, se atribuye a la marcada diferencia en valor energético entre los combustibles fósiles y switchgrass, la cual limita el establecimiento de un precio competitivo para switchgrass.

Flujos de valor presente para el primer escenario.

Dados los excelentes resultados, mostrados por los supuestos del primer escenario, se crearon presupuestos de capital para cada una de las distribuciones de retornos anuales de efectivo, utilizándolas para generar los retornos de los años de madurez del cultivo y asumiendo para los años de establecimiento los resultados obtenidos en los presupuestos operativos. Cabe mencionar que la limitante de éste escenario es que asume que la media aritmética de la distribución permanece constante a través del tiempo.

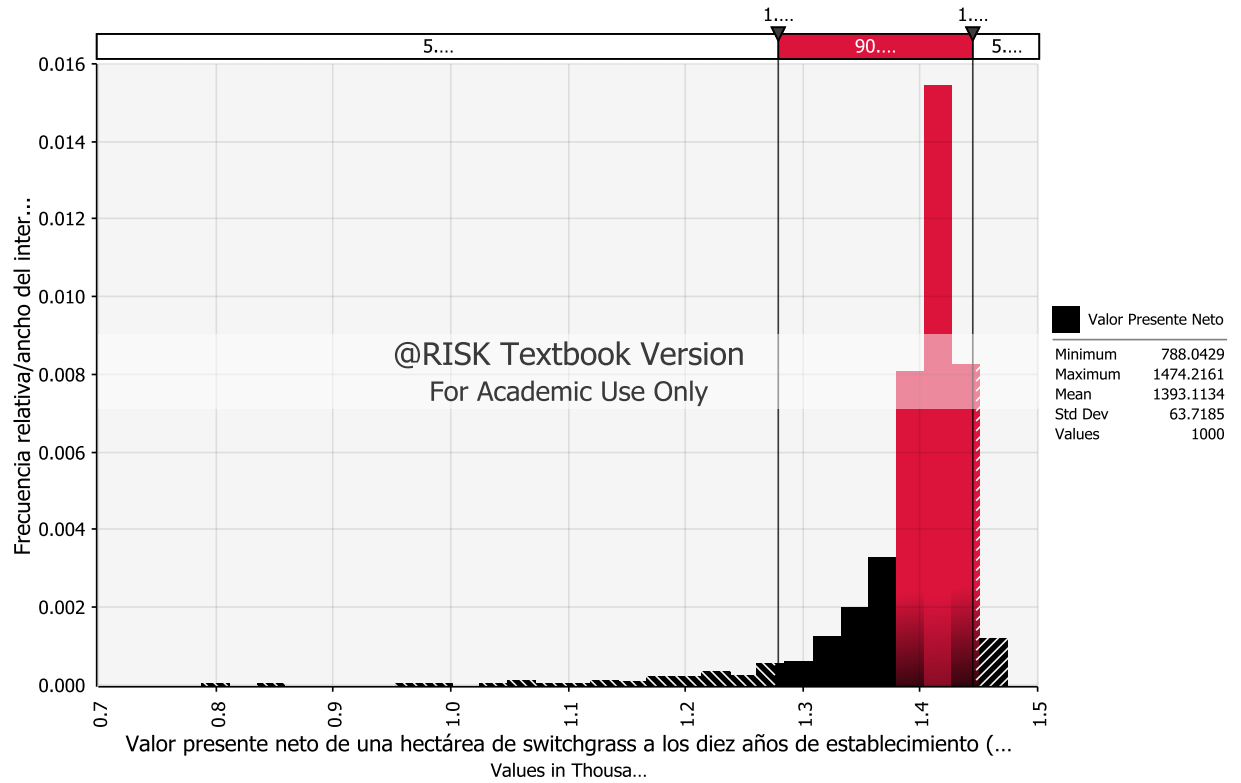


Figura 15. Distribución de probabilidad del valor presente neto en USD\$, simulado para un establecimiento de switchgrass de una hectárea en un período de diez años.

En la Figura 15 observamos que existe una probabilidad aproximada de un 9% de obtener un valor actual neto menor a cero. En este escenario no se contempla la tendencia de los precios de diesel y nitrógeno a incrementar.

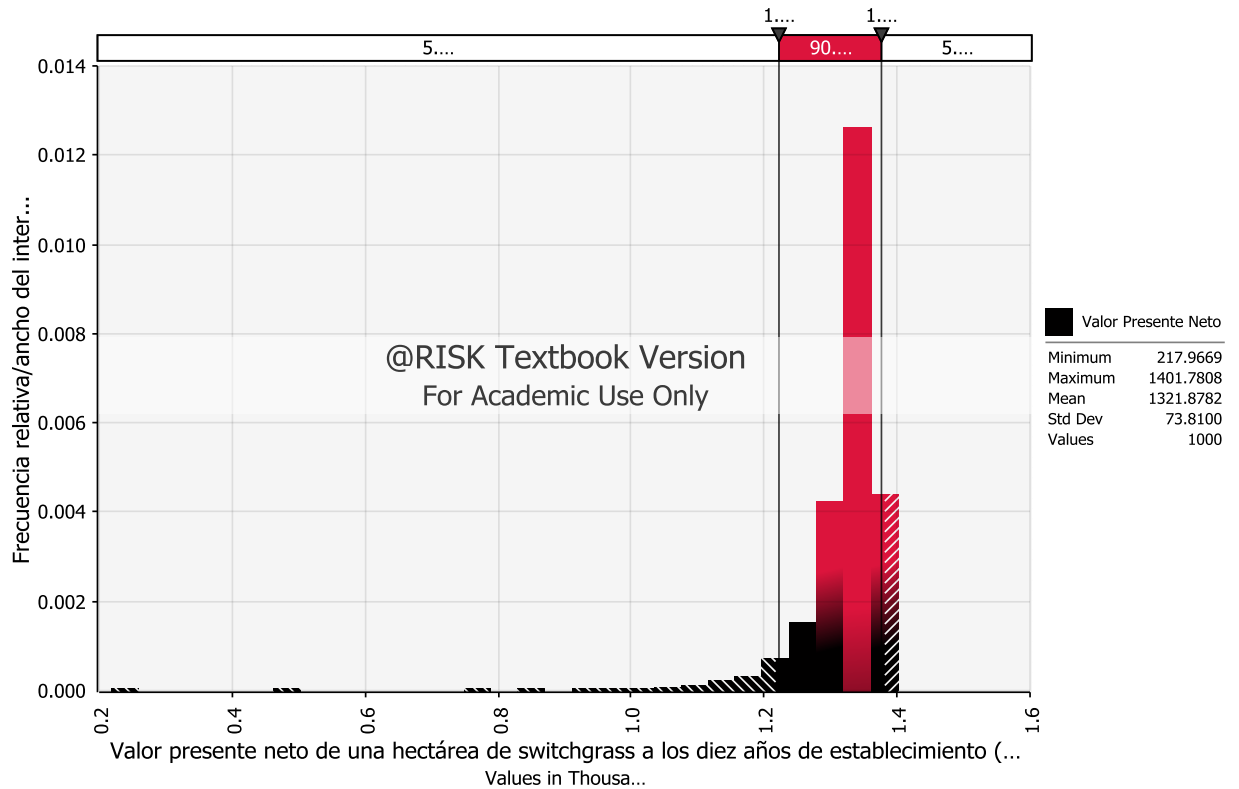


Figura 16. Distribución de probabilidad del valor presente neto en USD\$, simulado para un establecimiento de switchgrass de una hectárea en un período de diez años y utilizando variables ajustadas.

Esta Figura muestra en un 23% la probabilidad de obtener un valor presente neto negativo. Bajo la asunción de que los costos de nitrógeno y diesel continuarán incrementando.

5. CONCLUSIONES

- El costo de producción anual por hectárea cultivada de switchgrass, en un sistema de una única cosecha, es de USD\$ 852.68.
- La energía requerida en combustibles para la producción de una hectárea de switchgrass en Carolina del sur. y bajo un sistema de una única cosecha anual, se estima en 2, 683,200.47 kJ.
- En un escenario de costos de nitrógeno y diesel variables, a un precio de USD\$ 66/t de materia seca y asumiendo que el resto de los costos permanecen constantes, en un sistema de una única cosecha anual, existe una probabilidad del 90% de que el retorno anual neto se encuentre entre los 361 y 390 USD\$/ha.
- En un escenario, en el que el precio de mercado de switchgrass se establece en función de su equivalencia energética con la gasolina, las probabilidades de obtener retornos netos positivos por hectárea cultivada son menores al 5%. Esto como resultado de la significativa diferencia entre el valor energético de la gasolina y el etanol.
- El escenario que reflejo los retornos netos por hectárea más bajos, fue en el que se asumía que el precio de mercado de switchgrass era determinado en función de su equivalencia energética con el carbón. Este escenario no resulta viable debido a los precios históricos bajos del carbón.
- A un precio fijo de USD\$ 66/t de materia seca de switchgrass y asumiendo costos constantes a través del tiempo, en un sistema de una única cosecha anual, el valor presente neto obtenido en una hectárea de switchgrass en un período de diez años, sería de USD\$ 303.01. Por lo tanto, bajo estos supuestos de precios y costos, switchgrass representaría una alternativa rentable para los productores de Carolina del Sur.
- A un precio fijo de USD\$ 66/t de materia seca de switchgrass y asumiendo precios variables de nitrógeno y diesel, en un sistema de una única cosecha anual, existe un 90% de probabilidad de que el valor presente neto obtenido en una hectárea de switchgrass en un período de diez años, se encuentre ente los USD\$ 1,221 y los USD\$ 1,375.
- Pese a que factores como riesgo y costos de gerencia no se consideraron en los presupuestos, la naturaleza misma de switchgrass sugiere que la inclusión de estos no debería de generar cambios drásticos en los rendimientos proyectados.

- La diferencia entre los precios simulados para switchgrass en función de su equivalencia energética con la gasolina y el carbón y el precio ofertado por la planta Carolina Pacific de 66 USD\$/t, responde a factores como ser, la captación de CO₂ por parte de switchgrass, su efecto positivo en suelos marginales y su papel como hábitat para el desarrollo de la biodiversidad, los cuáles son externalidades positivas que aumentan el valor del cultivo.
- El valor energético de switchgrass resulta insuficiente para el establecimiento de precios de mercado competitivos, por lo que la contabilización de sus externalidades positivas es un requisito para su rentabilidad como cultivo energético.

6. RECOMENDACIONES

- Desarrollar estudios que cuantifiquen de manera más precisa los factores de riesgo climático involucrados en la producción de switchgrass.
- Desarrollar más investigación en cuanto a los rendimientos de switchgrass, bajo las condiciones de suelos, clima, geografía y prácticas tradicionales del estado de Carolina del Sur.
- Incluir en las estimaciones de energía requerida en campo, el valor energético de los fertilizantes y la energía requerida para el transporte de las pacas de switchgrass hacia las plantas de procesamiento.

7. LITERATURA CITADA

Bangsund D., DeVuyst E., y Leistriz F. 2008. Evaluation of Breakeven Farm-gate Switchgrass Prices in South Central North Dakota. Agribusiness and Applied Economics Report 632-S.

Brejda J., Moser L., y Vogel P. 1998. Evaluation of switchgrass rhizosphere microflora for enhancing seedling yield and nutrient uptake. Agron. J. 90:753-758.

Brummer E., Burras C., Duffy M., y Moore, K. 2002. Switchgrass Production in Iowa: Economic analysis, soil suitability, and varietal performance.

Casler M., Vogel K., Taliaferro C., Ehlke N., Berdahl J., Brummer E., Kallenbach R., West C., y Mitchell R. 2007. Latitudinal and longitudinal adaptation of switchgrass populations. Crop Science. 47:2249-2260.

Casler M., Vogel K., Taliaferro C., y Wynia R. 2004. Latitudinal adaptation of switchgrass populations. Crop Science 44: 293-303.

Cassida K., Muir J., Hussey M., Read J., Venuto B., y Ocumpaugh W. 2005. Biomass yield and stand characteristics of switchgrass in South Central U.S. environments. Crop Science. 45:673-681.

Farm Facts for South Carolina. 2009. 3-09. Clemson University.

Duffy M., y Nanhou V. 2002. Costs of Producing Switchgrass for Biomass in Southern Iowa. Bioenergy Feedstock Development Program.

Energy Information Administration (EIA). 2006. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2006. [Report #:DOE/EIA-05545H](#)

Fike J. , Parrish D., Alwang J., y Cundiff, J. 2007. Challenges for deploying dedicated, large-scale, bioenergy systems in the USA. CAB Reviews.doi:10.1079/PAVSNNR20072064.

Griffith A., Larson J., English B. y McLemore D. 2009. Stochastic Dominance Analysis of Bioenergy Crops as a Production Alternative on an East Tennessee Beef and Crop Farm. Southern Agricultural Economics Association.

Gunderson C., Davis E., Jager H., West T., Perlack R., Brandt C., Wulschleger S., Baskaran L., Wilkerson E., y Downing, M. 2008. Exploring Potential U.S. Switchgrass Production for Lignocellulosic Ethanol. Oak Ridge National Laboratory.

Hultquist S., Vogel K., Lee D., Arumuganathan K., y Kaeppler S. 1997. DNA content and chloroplast DNA polymorphisms among switchgrasses from remnant midwestern prairies. *Crop Science*. 37: 595-598.

Jannasch R., Quan Y., Samson R. 2001. A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass. Natural Resources Canada, Alternative Energy Division.

Kay R., Edwards W., y Duffy P. 2004. Farm management. 5th. ed. Boston: McGrawHill.

Khanna y Madhu *et al.* "Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois". *Biomass and Bioenergy*, vol 32 (2008), pp 482-493.

Kotrba, R. 2008. "Commercial Biorefinery Update." *Biomass Magazine* pp. 22-26.

Kszos L., McLaughlin S., y Walsh M. 2002. BIOENERGY FROM SWITCHGRASS: REDUCING PRODUCTION COSTS BY IMPROVING YIELD AND OPTIMIZING CROP MANAGEMENT.

Kumar, Amit; Sokhansanj, Shahab. 2007. "Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model". *Bioresource Technology*, Vol 98 (2007), pp 1033-1044.

Larson J. 2008. Risk and Uncertainty at the Farm Level (diapositivas). Marina Berkeley, CA., US. 22 diapositivas, muda, color.

Ma Z., Wood C., y Bransby D. 2000. Soil management on soil C sequestration by switchgrass. *Biomass and Bioenergy* **18**: 469–477.

Madakadze I., Stewart K., Peterson P., Coulman B., y Smith, D. 1999. Cutting frequency and nitrogen fertilization effects on yield and nitrogen concentration of switchgrass in a short season area. *Crop Science*. 39:552-557.

McLaughlin S., y Kszos, L. 2005. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass Bioenergy* 28:515-535.

McLaughlin S., Bouton J., Bransby D., Conger B., Ocumpaugh W., Parrish D., Taliaferro C., Vogel K., y Wulschleger S. 1999. Developing Switchgrass as a Bioenergy Crop.

McLaughlin S., Samson R., Bransby D., y Weislogel A. 1996. Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. *Proc. Bioenergy 96*, Nashville, TN, Sept. 1996. p. 1–8.

McLaughlin S. 1992. New switchgrass biofuels research program for the Southeast. Proc. Ann. Auto. Tech. Dev. Contract. Mtng., Dearborn, MI, Nov. 2–5, 1992. p. 111–115.

Miller S. 2009. How sustainable is bioenergy? (diapositivas). Florence, SC., US. 7 diapositivas, muda, color.

Mooney D., Roberts R., English B., Tyler D., Larson J. 2008. Switchgrass Production in Marginal Environments: A Comparative Economic Analysis across Four West Tennessee Landscapes. American Agricultural Economics Association.

National Renewable Energy Laboratory, Oak Ridge National Laboratory, and Pacific Northwest Laboratory, 1991, *A Comparative Analysis of the Environmental Outputs of Future Biomass-Ethanol Production Cycles and Crude Oil/Reformulated Gasoline Production Cycles, Appendixes*, prepared for U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies and Office of Planning and Assessment, Golden, Colo., Dec

Parrish J., Fike J., Bransby D., y Samson, R. 2008. Establishing and managing switchgrass as an energy crop. Forage and Grazinglands doi:10.1094/FG-2008-0220-01-RV.

Parrish D., y Fike, J. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for Biofuels. Crit. Rev. Plant Science. 24:423-459.

Paulson N., y Ginder R. 2007. “The Growth and Direction of the Biodiesel Industry in the United States.” CARD Working Paper 07-WP 448, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.

Porter C. 1966. An analysis of variation between upland and lowland switchgrass, *Panicum virgatum* L., in central Oklahoma. Ecology, 47: 980- 992.

Pimentel D., y Patzek T. 2005. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. Natural Resources Research 14(1).

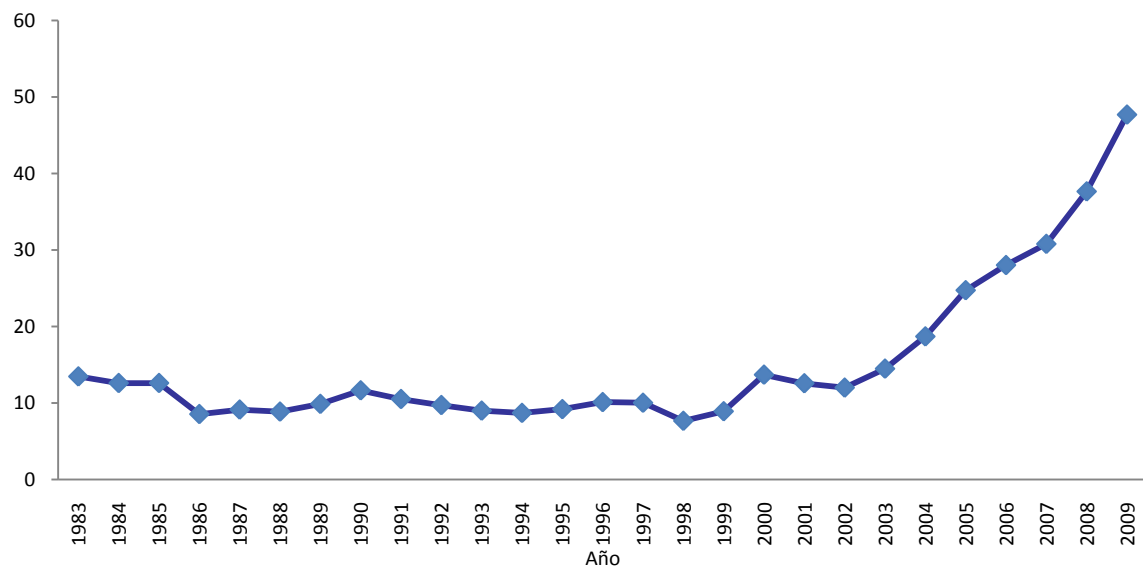
Pimentel D. 2001, The limitations of biomass energy, in Meyers, R., ed., Encyclopedia of Physical Science and Technology. (3rd edn.), Vol. 2: Academic, San Diego, CA, p. 159 171.

Sanderson M., Read J., Ocumpaugh W., Hussey M., Van E., Read J., Tischler C., Hons F. 1999. Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas. Bioresource Technology 1999;67:209–19.

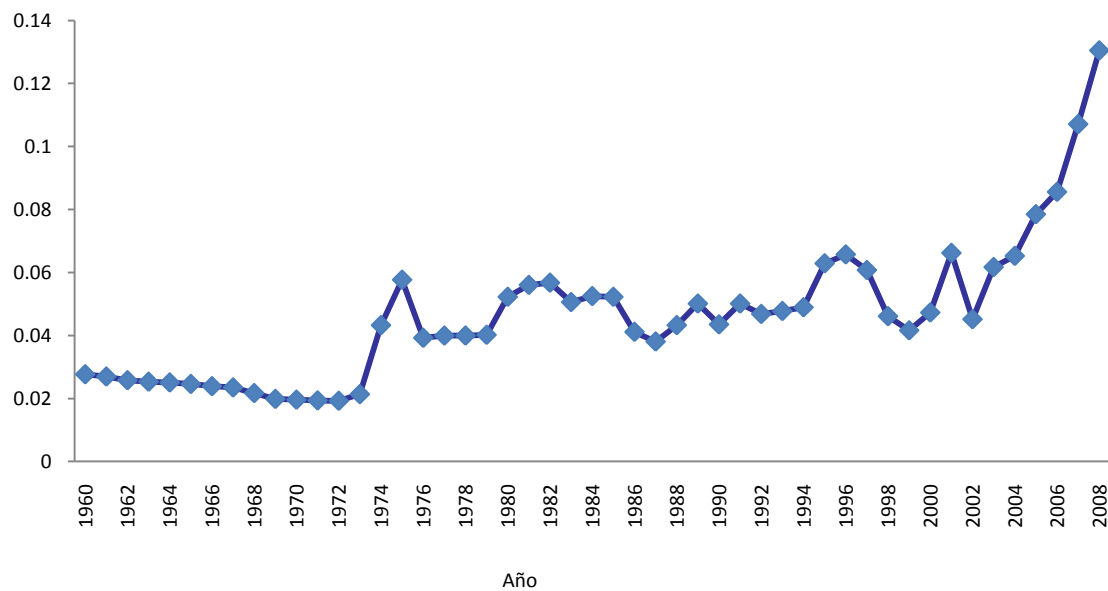
Sanderson M., Reed R., McLaughlin S., Wulschleger S., Conger B., Parrish D., Wolf D., Taliaferro C., Hopkins A., Ocumpaugh W., Hussey M., Read J., y Tischler C. 1996. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. Bioresource Tech. 56:83-93.

- Schmer M., Vogel K., Mitchell R., Moser L., Eskridge K., y Perrin R. 2006. Establishment stand thresholds for switchgrass grown as a bioenergy crop. *Crop Sci.* 46:157-161.
- Shapouri H., Duffield J., y Graboski M. 1995. "Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol. Agricultural Economic Report No. 721. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy and New Uses.
- Shiflet T., y Darby G. 1985. Forages and soil conservation. p. 21–32. In: M.E. Heath, R.F. Barnes, and D.S. Metcalf (eds.), *Forages: The science of grassland culture*. Iowa State Univ. Press, Ames.
- Solomon B., Barnes J., y Halvorsen K. 2007. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. *Biomass and Bioenergy* 31:416-425.
- Sun Y., y Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* 83:1-11.
- Thomason W., Raun W., Johnson G., Taliaferro C., Freeman K., Wynn K., and Mullen R. 2004. Switchgrass response to harvest frequency and time and rate of applied nitrogen. *J. Plant Nutr.* 27:1199-1226.
- Tokgoz S., Elobeid A., Fabiosa F., Hayes D., Babcock B., Yu T., Dong T., Hart C., y Beghin J. 2007. "Emerging Biofuels: Outlook of Effects on U.S. Grain, Oilseed, and Livestock Markets." CARD Staff Report 07-SR 101, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University.
- Vadas P., Barnett K., y Undersander D. 2008. Economics and Energy of Ethanol Production from Alfalfa, Corn, and Switchgrass in the Upper Midwest, USA. *Bioenerg. Res.* 1:44-55.
- Walsh M. 2000. Method to estimate bioenergy crop feedstock supply curve. *Biomass and Bioenergy* 18:283-289.
- Wang M., Saricks C., y Santini D. 1999. "Effects of Fuel Use on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Emissions." Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne IL, ANL/ESD-38.
- Weaver J. 1968. *Prairie plants and their environment*. Univ. Nebraska Press, Lincoln.
- White M., Vodak M., y Cupp D. 1984. Effect of surface compaction on the moisture content of piled green hardwood chips. *Forest. Prod. J.* 34:59–60.
- Wolf D., y Fiske D. 1995. Planting and managing switchgrass for forage, wildlife, and conservation. Virginia Coop. Ext. Pub. No. 418-013. Virginia Tech., Blacksburg, VA.
- Worldwatch Institute. 2006. *Biofuels for transportation*. Preparado para el ministerio alemán de agricultura, alimentos y protección al consumidor, Washington, DC.

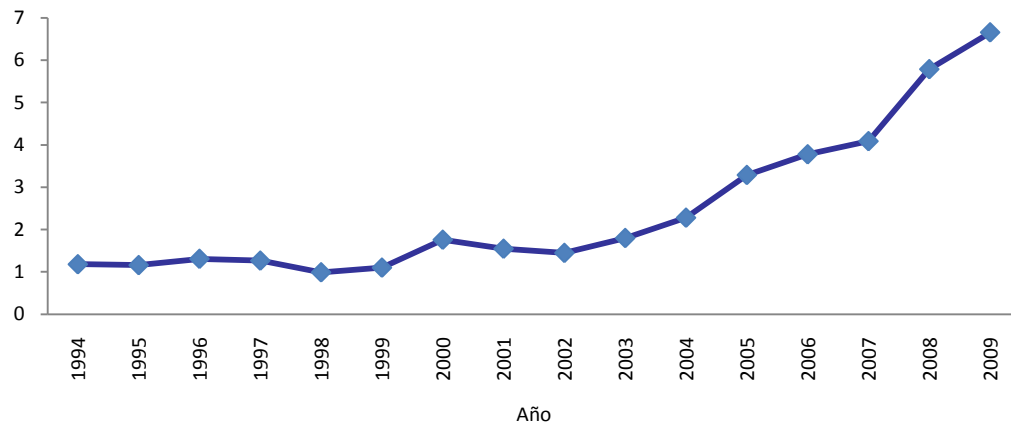
8. ANEXOS



Anexo 1. Serie de tiempo sobre los precios de switchgrass como energía equivalente a la gasolina (USD\$/t).



Anexo 2. Serie de tiempo para precios históricos de nitrógeno (USD\$/kg).



Anexo 3. Serie de tiempo para los precios de diesel (USD\$/l)

Año	kg/ha	Costos de Producción Anual (USD\$)			Costos Totales	Retorno	Flujo Neto	Flujo Neto Acumulado	Factor de descuneto (%) 7	Valor Presente Neto
		Materiales	Equipo	Mano de Obra						
1		570.67	111.76	22.60	705.04	0	-705.04	-705.04	1.00	-705.04
2	7845.96	186.49	240.75	43.26	470.50	518.922	48.42	-656.61	0.87	42.29
3	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	-471.45	0.82	151.15
4	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	-286.28	0.76	141.26
5	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	-101.11	0.71	132.02
6	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	84.06	0.67	123.38
7	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	269.22	0.62	115.31
8	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	454.39	0.58	107.77
9	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	639.56	0.54	100.72
10	15691.92	346.79	430.53	75.35	852.68	1037.84	185.17	824.72	0.51	94.13
	Total									303.01

Anexo 4. Presupuesto de capital para un establecimiento de switchgrass a diez años (USD \$/ha).