



Manual del Sorgo Dulce

cultivo con potencial energético

Autor:

Cosette Khawaja

Co-autores:

Rainer Janssen, Domink Rutz, , Delphine Luquet, Gilles Trouche, Bellum Reddy, Pinnamanini Srinivas Rao, G. Basavaraj, Robert Schaffert, Cynthia Damasceno, Rafael Parella, Arndt Zacharias, Raoul Bushmann, Nils Rettenmaier, Guido Reinhardt, Andrea Monti, Walter Zegada Lizarazu, Stefano Amaducci, Adriano Marocco, Wikus Snijman, Nemera Shargie, Hannelie Terblanche, Francisco Zavala-Garcia, Serge Braconnier.

ISBN : 978-3-936338-31-7

Traducciones:

El lenguaje original de este manual es Inglés. Esta manual está disponible en Inglés, Portugués y Francés. Traducido al español por: Ph.D. Francisco Zavala García y M.C. Jaime Armendáriz Velázquez.

Publicado:

© por WIP Renewable Energies,
Sylvensteinstr. 2, 81369 Munich, Germany

Contacto:

Cosette Khawaja

WIP Renewable Energies

cosette.khawaja@wip-munich.de

Tel.: +49 89 720 12 740

www.wip-munich.de

Dr Serge Braconnier

CIRAD, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

serge.braconnier@cirad.fr

Tel.: +33 467 61 7539

www.cirad.fr

Sitio Web: www.sweetfuel-project.eu

Copyright : Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total, en cualquier formato o medio de este manual con fines de uso comercial sin el permiso escrito del editor. Los autores no garantizan la exactitud de la información y los datos incluidos o descritos en el presente manual.

Renuncia: La responsabilidad del contenido de este manual corresponde únicamente a sus autores. No refleja necesariamente la opinión de la Unión Europea. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pueda hacerse de la información contenida en el mismo.



Agradecimientos

El Proyecto SWEETFUEL

Introducción	1
Características del sorgo dulce	2
Uso Histórico del sorgo dulce	2
Clasificación Botánica del sorgo dulce	3
Morfología	4
Semillas	4
Raíces	5
allo y Pedúnculo	5
Hojas	5
Inflorescencia	6
Etapas de Crecimiento	6
Resumen de las Características del sorgo dulce	7
Diversidad genética para características útiles	8
Amplitud de la Adaptación Agroecológica	10
Tolerancia a la Sequia	10
Uso eficiente de agua y radiación	11
Alta eficiencia en la utilización de nitrógeno	11
Tolerancia a la salinidad y alcalinidad	11
Sensibilidad al Fotoperiodo	12
Ventajas en comparación con Caña de Azúcar	12
Cultivo del Sorgo Energético	13
Preparación del suelo	13
Siembra	13
Fertilización	15
Plagas de la planta y su control	15
Malas Hierbas	15
Enfermedades Bacterianas y Fúngicas	16
Enfermedades Virales	22
Plagas de Insectos	22
Nematodos	28
Cosecha y Logística	28
Aplicaciones del Sorgo Energético	32
Producción de Jarabe	33

Producción de Bioetanol de 1ª Generación	34
Producción de Bioetanol de 2ª Generación (Materiales Ligno-celulósicos)	37
Producción de biogás mediante la digestión anaeróbica	38
Combustión de la Biomasa del Sorgo Dulce	40
Subproductos	43
Sustentabilidad del Sorgo Energético	43
Revisión de las Cadenas Productivas del Sorgo Energético	44
Sistemas Tropicales de Producción	45
Sistemas de Producción en Climas Templados	47
Impactos Económicos	48
Rentabilidad Económica y Equidad	48
Eficiencia total del proceso	50
Inversiones Necesarias para la Instauración del Sistema y su Operación	51
Impacto Social	51
Seguridad Alimentaria y Energética	52
Derechos de Propiedad de la Tierra	53
Creación de Empleos, Salud y Condiciones de Trabajo	54
Aceptación pública y de las partes interesadas	55
Impactos Ambientales	55
Balance de Energía	55
Emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes	57
Cambio de uso de suelo (LUC)	58
Biodiversidad	59
Glosario	63
Abreviaciones	68
Créditos de las Figuras	69
Índice de Figuras	70
Índice de Cuadros	71
Bibliografía	72

Agradecimientos

Este manual fue elaborado en el marco del proyecto SWEETFUEL (acuerdo de subvención número 227422), apoyado por la Comisión Europea a través del Seventh Framework Programme (FP7). Los autores desean agradecer a la Comisión Europea por el apoyo del proyecto SWEETFUEL, así como a los revisores y socios SWEETFUEL por su contribución al manual.

El Proyecto SWEETFUEL

Los objetivos del proyecto SWEETFUEL fueron generar variedades mejoradas e híbridos de sorgo para ambientes templados, tropicales semiáridos y tropicales con suelos ácidos, por piramidación en diversas combinaciones, dependiendo de la región e ideotipo, tolerancia al frío, la sequía y suelos ácidos (toxicidad por Al); y alta producción de azúcares en el tallo, biomasa de fácil digestión y rendimiento de garano. Durante el proyecto, se obtuvo apoyo para el mejoramiento con el uso de técnicas de genética molecular y fisiología de la planta buscando adaptación agroecológica y el desarrollo de prácticas sustentables. También se incluyeron evaluaciones integrales de la tecnología y de impacto. Los resultados del proyecto serán nuevo germoplasma, prácticas de producción sustentables y conceptos de la cadena de valor básicos adaptados a cada región objetivo. La investigación en el proyecto SWEETFUEL implicó la participación estructurada de las partes interesadas, incluidas las estructuras participantes en la toma de decisiones políticas.

Composition du consortium du projet SWEETFUEL



CIRAD

Centre de coopération
internationale en recherche
agronomique pour le
développement

Contact :

Dr Serge BRACONNIER



ICRISAT

International Crops Research
Institute for the Semi-Arid
Tropics

Contact :

Dr Pinnamanini Srinivasa RAO



EMBRAPA

Maize and Sorghum: Empresa
Brasileira de Pesquisa
Agropecuária

Contact :

Dr Robert SCHAFFERT



KWS

KWS SAAT AG

Contact :

Dr Arndt ZACHARIAS



IFEU

Institut für Energie- und
Umweltforschung Heidelberg
GmbH



Contact :

Dr Guido REINHARDT

UNIBO

Alma Mater Studiorum Univer-
sità di Bologna

Contact : *Dr Andrea MONTI*



UCSC

Università Cattolica del Sacro
Cuore

Contact :

Dr Stefano AMADUCCI



ARC-GCI

Agricultural Research Council –
Grain Crop Institute

Contact :

Wikus SNIJMAN



UANL

Universidad Autónoma de
Nuevo León / Facultad de
Agronomía

Contact :

Dr Francisco ZAVALA-GARCIA



WIP

WIP Renewable Energies

Contact :

*Dr Rainer JANSSEN,
Dominik RUTZ*

Introducción

El aumento de los precios del mercado mundial de los combustibles fósiles, impulsados por las limitadas reservas, la creciente demanda y la inestabilidad en las regiones productoras, ahora hacen a los combustibles renovables económicamente viables. Estos combustibles son también una vía para la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y la mitigación del cambio climático. El sector del transporte, que depende casi totalmente del petróleo, sobre todo para alimentar los vehículos personales y camiones, es el sector más relacionado. Los biocombustibles, que se definen como combustibles sólidos, líquidos o gaseosos derivados de la biomasa, son hoy en día, el único sustituto directo del petróleo en gran escala particularmente en el sector del transporte. Los biocombustibles son considerados amigables con el medio ambiente debido a que teóricamente las emisiones de CO_2 que se producen durante la combustión, son compensadas con el CO_2 absorbido durante el crecimiento de las plantas. Para ser un sustituto viable del combustible fósil, un combustible alternativo no sólo debe tener beneficios ambientales superiores, debe ser también económicamente competitivo y disponer cantidades suficientes como para causar un impacto significativo en la demanda de energía; además, deberá también proporcionar una ganancia neta de energía comparada con la energía invertida para producirlo y tener un efecto mínimo en la seguridad alimentaria.

El bioetanol es un tipo de biocombustible líquido resultante de la fermentación de los azúcares. Para que el bioetanol represente una alternativa viable en la dependencia de petróleo estará en función de la materia prima y la ubicación de la producción. La producción de caña de azúcar en Brasil tiene un balance energético positivo y permite grandes ahorros de GEI, pero la producción de maíz en los EEUU, presenta resultados menos positivos, sino a veces saldos negativos.

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cultivos más eficientes para convertir el CO_2 atmosférico en azúcar; dependiendo de su cultivo, puede tener grandes ventajas en comparación con la caña de azúcar en los trópicos y con el maíz en las zonas templadas, por lo que es un cultivo prometedor tanto para la producción de bioenergía como para cubrir necesidades de alimentos y forrajes. Entre los diferentes cultivos que han sido previstos para la producción de etanol, el sorgo dulce parece tener un gran potencial sin explotar. El sorgo dulce es la mejor cultivo multipropósito para la producción simultánea de (i) el grano de la panoja como alimento, (ii) el jugo azucarado de su tallo para hacer el jarabe, azúcar morena o etanol, (iii) el bagazo y el follaje verde pueden utilizarse excelentemente como forraje para los animales, así como biomasa para el sistema de gasificación y bioetanol de segunda generación, como abono orgánico, para la fabricación de papel o como combustible para la cogeneración de electricidad. Además, el sorgo dulce es una planta C_4 con muchas ventajas potenciales, incluyendo una alta eficiencia en el uso

del agua, nitrógeno y radiación, una amplia adaptación agroecológica, así como una rica diversidad genética de características útiles. Para los países en desarrollo, el sorgo dulce proporciona oportunidades para la producción simultánea de alimentos y de bioenergía, contribuyendo así a la seguridad alimentaria, así como un mayor acceso a las fuentes de energía asequibles y renovables. En las regiones templadas (por ejemplo en Europa) el sorgo se considera como un cultivo promisorio para la producción de materia prima en la producción de bioetanol de 2ª generación.

A diferencia de la caña de azúcar y el maíz, el sorgo dulce tiene poca historia en el mejoramiento genético por lo que tiene un alto potencial en la explotación de caracteres genéticos útiles a través de la mejora genética. Con el fin de aprovechar las ventajas de sorgo dulce como cultivo energético potencial para la producción de bioetanol, el proyecto SWEETFUEL (sorgo dulce: un cultivo energético alternativo) se puso en marcha y es apoyado por la Comisión Europea en el 7th Framework Programme. De este modo, el objetivo principal de SWEETFUEL es optimizar el rendimiento a través del mejoramiento genético y la mejora de prácticas culturales y de cosecha en ambientes templados, tropicales semiáridos y tropicales con suelos ácidos. El propósito de este Manual es servir como referencia para el cultivo de sorgo dulce, principalmente para la producción de bioenergía.

Características del sorgo dulce

Uso Histórico del sorgo dulce

El sorgo es uno de los cultivos más antiguos de la historia. Se cree que se originó en África. Se observó una amplia gama de variedades del género *sorgo* en las regiones del noreste de África que comprenden Etiopía y Sudán en África del Este (Doggett 1988).

Durante el primer milenio BC, el sorgo se llevó probablemente a la India desde el este de África en barcos como alimento debido al tráfico Chino que operó por cerca de 3.000 años entre el este de África y la India a través de la Sebaean Lane en el sur de Arabia. Este cultivo se podría haber extendido a lo largo de la costa del sudeste de Asia en torno a China a principios de la era cristiana. Sin embargo, una posibilidad que no se puede negar es que el sorgo podría haber llegado mucho antes a China por las rutas del comercio de seda (FAO 1995). Alrededor de 200 AD o incluso antes, el sorgo se abrió camino en el este de África desde Etiopía a través de las tribus locales que cultivaron sorgo, principalmente para la producción de grano, en tanto que la caña dulce era masticada por placer y nutrición. Más tarde, la tribu Bantú llevó este cultivo con ellos a las regiones de la Savannnah al occidente y sur de África utilizando el grano principalmente para la fabricación de cerveza. La tribu Bantú más tarde trasladó este cultivo durante su expansión de la región sur de Camerún alrededor del siglo I AD a la frontera sur de la franja boscosa del Congo (FAO 1995). El sorgo se introdujo en las islas del Caribe y otros países de América Latina desde el África occidental a través de la trata de esclavos y por los navegantes en la ruta comercial Europa-África-América Latina a inicios del siglo 17 (Srinivasa Rao y Kumar 2013).

El primer cultivar de sorgo dulce “China Amber” se introdujo desde Shanghai, China a Francia en 1851 por Mr. Montigny, cónsul de Francia en Shanghai (Henri 1864). Posterior-

mente de Francia llegó a EEUU en 1853 por William Prince, propietario de un vivero de Nueva York que recibió las semillas de Francia (Srinivasa Rao y Kumar 2013). En los EEUU se utilizó el sorgo dulce como cultivo de azúcar para producir jarabe. Varios grupos intentaron producir azúcar granulado a partir de jugo de sorgo dulce, pero descubrieron que la fructosa y la glucosa en el jugo interfieren con la cristalización de la sacarosa. Concentrar el azúcar en jarabe resultó ser la manera más fácil de hacer un producto estable para el consumo y las ventas.

Debido al rápido aumento de los precios del petróleo crudo que se produjeron durante la década de 1970, el sorgo dulce se ha investigado como una posible fuente de azúcares fermentables para la producción de combustible de etanol debido al contenido de altos niveles de azúcar y la producción de biomasa, la amplia adaptación geográfica y climática y las relativamente bajas necesidades de agua y fertilizantes. En muchos países, la financiación de la investigación de combustibles alternativos “verdes” ha aumentado debido a la preocupación pública por el posible cambio climático a partir de dióxido de carbono producido por la quema de combustibles fósiles y el deterioro de la oferta mundial de petróleo (Halford y Karp 2011).

El sorgo dulce es similar al sorgo de grano, pero acumula grandes cantidades de azúcar en los tallos que se puede utilizar para una gran variedad de usos, tales como alimentos, forraje, combustible y fibra acorde con el sobrenombre de ‘Smart Crop’ (Kumar *et al.* 2010).

El sorgo dulce también es valorado por la producción de productos comerciales, tales como el alcohol (potable y de calidad industrial), jarabes (natural y alta fructosa), glucosa (líquida y polvo), almidones modificados, maltodextrinas, azúcar morena, sorbitol y ácido cítrico (productos derivados a partir de almidón) (CFC-ICRISAT 2004). Además, debido a su contenido de fibra de sorgo dulce se puede utilizar como aislante en el suelo y para la fabricación de techos, cercas y papel.

Clasificación Botánica del sorgo dulce

La clasificación del sorgo se muestra a continuación:

División: Magnoliophyta
Clase: Liliopsida
Subclase: Commelinidae
Orden: Cyperales
Familia: Poaceae
Subfamilia: Panicoideae
Tribu: Andropogoneae
Subtribu: Sorghinae
Género: *Sorghum bicolor*

El género *S. bicolor* representa a todos los sorgos cultivados, silvestres y de malas hierbas anuales, junto con dos taxa rizomatosos: *S. halepense* y *S. propinquum*. *S. bicolor*

se subdivide en tres subespecies: *S. bicolor* subsp. *bicolor*, *S. bicolor* subsp. *drummondii* y *S. bicolor* subsp. *verticilliflorum*. Los sorgos cultivados se clasifican como *S. bicolor* subsp. *bicolor* (Harlan y de Wet 1972). House (1985) describió con más detalle las cinco diferentes razas principales: *bicolor*, *caudatum*, *curra*, *indias*, y *kafir*. El nombre correcto para el sorgo cultivado que está actualmente en uso fue propuesto por Clayton en 1961 y es *Sorghum bicolor* L. Moench.

Todos los sorgos identificados botánicamente como *Sorghum bicolor* subsp. *bicolor* tienen $2n = 20$ cromosomas. Los cultivares comerciales de *Sorghum bicolor* (L.) Moench se clasifican en las siguientes variantes agronómicas: sorgo de grano, sorgo de forraje (o forrajero), sorgo de fibra, sorgo escoba, sorgo dulce y sorgo biomasa. La orientación agronómica de la variedad depende de sus características fenotípicas.

Sorgos de grano: cultivares de sorgo con alto rendimiento de grano utilizado para consumo humano y de ganado;

Sorgos Fibra: cultivares de sorgo con alto contenido de fibra; potencialmente usado como fibra o cultivos energéticos;

Sorgos Escoba: cultivares de sorgo que presentan inflorescencias largas y ramas elásticas, que se utiliza principalmente para las escobas;

Sorgos Dulces: cultivares de sorgo con tallos jugosos y alto contenido de azúcar en el jugo de sus tallos; potencialmente utilizado como energía y / o cultivo para consumo humano;

Sorgos Biomasa: cultivares de sorgo con alto rendimiento de biomasa lignocelulósica, potencialmente utilizado como cultivo energético se utilizará para referirse tanto el sorgo dulce como para el sorgo biomasa.

Morfología

Las diferentes estructuras botánicas de la planta de sorgo se esquematizan en la Figura 1.

Semillas

El sorgo es una planta anual que crece a partir de semillas. Las panículas de sorgo pueden producir hasta 4.000 semillas que contienen almidón. La semilla se compone de tres partes: pericarpio, albúmina y embriones. Es de forma esférica, pero un poco plana en un lado. Varían en tamaño (peso de 1000 semillas varía de 6 a 85 g) y en color desde el rojo, marrón y blanco hasta negro (Figura 2).

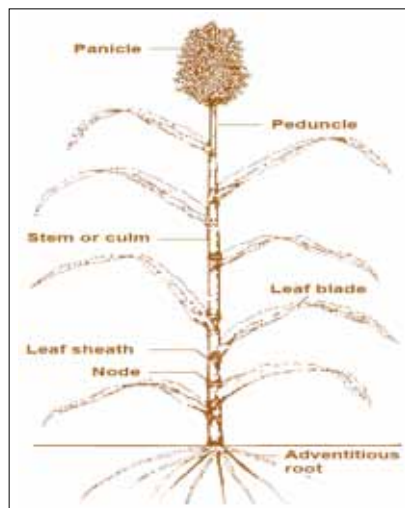


Figura 1: Estructuras botánicas de la planta de sorgo (Murty et al. 1994)

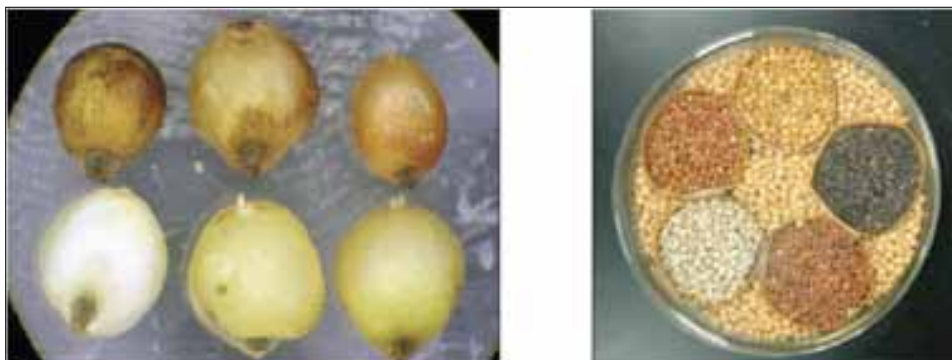


Figura 2: Diferentes variedades de semillas de sorgo dulce. Se puede observar la amplia variabilidad de formas y colores (Reddy et al. 2008)

Raíces

El Sistema radical del sorgo consiste en tres diferentes tipos de raíces: Raíces Primarias, Raíces Secundarias o Adventicias y Raíces de Anclaje. Las raíces primarias se desarrollan a partir de la radícula y mueren posteriormente. Después de la senescencia de las raíces primarias, las raíces adventicias se desarrollan desde los nodos que se encuentran bajo el nivel del suelo y se pueden extender hasta 2 m. Las raíces adventicias son pequeñas y uniformes. Estas raíces suministran principalmente nutrientes a la planta. Las raíces de anclaje se desarrollan a partir de los primordios de raíz de los nodos basales por encima del nivel del suelo. Estas raíces proporcionan anclaje a la planta (Agropedia 2013).

Figure 3: Raíces de anclaje en sorgo dulce (©Braconnier)



Tallo y Pedúnculo

El sorgo desarrolla un tallo principal con macollos secundarios que crecen en la corona. El número de macollos depende de la variedad y las condiciones culturales. El tallo (o vástago) del sorgo se compone de nodos alternantes y entrenudos, cada nodo da soporte a una hoja. El diámetro de los tallos se encuentra en el rango de 0,5 a 5 cm de diámetro cerca de la base mientras que la altura en la madurez varía entre 0,5 a 5 m dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales.

El Pedúnculo es el entrenudo superior que soporta la inflorescencia. Su crecimiento es independiente del resto de la planta. Es generalmente recto, a excepción de las variedades de la raza Dura, en las cuales el pedúnculo es arqueado. Su longitud depende de la variedad y las condiciones ambientales.

Hojas

De acuerdo a las condiciones ambientales y de los cultivares, el número de hojas varía de pocas unidades hasta 30 hojas. Estas se componen de una larga vaina que abraza el tallo y una lamina cuya longitud es de 30 a 135 cm y de 13 a 15 cm de anchura. Las hojas

de sorgo son típicamente verdes, de un tono brillante y planas, y no tan anchas como las hojas de maíz. Las láminas de las hojas jóvenes están en posición vertical, pero estas tienden a doblarse hacia abajo conforme las hojas maduran. Los estomas se producen en ambas superficies de la hoja. Una característica única de las hojas de sorgo son las filas de células móviles a lo largo de la nervadura central en la superficie superior de la hoja. Estas células pueden enrollar las hojas rápidamente durante el estrés de humedad.

Inflorescencia

La estructura de la floración o inflorescencia (Figure 4) en el sorgo se llama panícula o panoja. La panícula es un tipo racimo compuesto (un cúmulo ramificado de flores en



Figura 4: Inflorescencia de Sorgo dulce (© izquierda, Braconnier, derecha, Rutz)

el que las ramificaciones son racimos). Cada racimo consta de una o varias espiguillas. La panícula puede ser corta, compacta suelta o abierta, compuesta por un eje central que lleva verticilos de ramas primarias en cada nodo. Los racimos varían en longitud de acuerdo con el número de nodos y la longitud de los entrenudos. Cada rama principal lleva ramas secundarias, que a su vez llevan espiguillas. El eje central de la panícula, el raquis, está completamente oculto por la densidad de las ramas de la panícula en algunos, mientras que está completamente expuesto en otros. Las espiguillas se presentan general-

mente por pares en las ramas, una que es sésil y fértil y en tanto que la segunda consta de un pedicelo corto el cual puede ser masculino o estéril.

Etapas de Crecimiento

Las etapas de crecimiento del sorgo empiezan por la germinación y termina en la etapa de madurez fisiológica. La duración de estas etapas de crecimiento puede variar según la fecha de siembra, el genotipo y la localidad (latitud).

Germinación: A temperatura óptima (25 °C a 30 °C) y humedad optima, la semilla de sorgo germina de 3 a 4 días. Cuando una semilla de sorgo se siembra en un suelo húmedo, las semillas se hinchan debido a la absorción de humedad. La cubierta de la semilla se rompe y emerge un pequeño brote (coleóptilo) y una raíz primaria (radícula). Si las temperaturas son más frescas, la emergencia puede requerir de 1 a 2 semanas.

Emergencia: Al principio, las plantas jóvenes toman nutrientes del endospermo de la semilla. El coleóptilo sale del suelo y la primera hoja emerge a través de la punta. El

mesocotilo crece durante este período y un nodo se forma en la base del coleóptilo justo debajo del nivel del suelo. Durante ese período, el crecimiento de la raíz es muy activa con la emisión de la raíz seminal luego raíces adventicias con un crecimiento rápido.

Etapas vegetativa: Después de la emergencia, el crecimiento vegetativo es intensivo con la producción de hojas, nudos, entrenudos, raíces y macollos para algunos cultivares (después de unos 15 días). La temperatura óptima para el crecimiento vegetativo es de 33-34 °C. Durante este tiempo y hasta la floración, la planta crece rápidamente. Se produce gran parte del área foliar, que será importante durante el período de llenado del grano. En este momento, la panoja desarrolla y el tallo crece rápidamente. El crecimiento que se produce después de la floración es resultado sólo de la extensión celular.

Etapas de emergencia y embuche: Antes de que aparezca la inflorescencia, la vaina de la hoja bandera se hincha y de 6 a 10 días, el pedúnculo crece rápidamente, empujando la panoja fuera de la vaina de la hoja bandera Permitiendo la aparición y el desarrollo de la panoja. Durante la floración, entre el 60 y el 70% de la absorción total de nutrientes ya se habría producido.

Floración: De 2 a 5 días después de la emergencia de la inflorescencia, las flores comienzan a abrirse. Esta fase corresponde a un profundo cambio en la fisiología de las plantas. La floración se puede observar a partir del polen en la anteras de color amarillo en la panoja. Se tarda 6 días para que toda la inflorescencia complete la floración. El sorgo se considera como una planta autógama incluso si la tasa de aloгамia pueda alcanzar el 30% en algunas variedades. La viabilidad de polen es corta, de 2 a 4 horas mientras que el período de receptividad del estigma es mucho más largo, varios días.

Madurez fisiológica: La etapa final de crecimiento, desde la floración hasta la madurez fisiológica, es importante el período de llenado del grano. Puede durar de 30 a 50 días dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales. Durante este tiempo, la mayor parte de los carbohidratos sintetizados por la planta entran en el grano. Las partes de las reservas almacenadas en el tallo se están moviendo hacia el grano y la planta está tomando aproximadamente el último tercio de las nutrientes. Si se produce una sequía, tanto la absorción de nutrientes y el llenado del grano pueden ser limitadas. Esta madurez fisiológica no es la madurez de la cosecha. En la madurez fisiológica, la humedad del grano será del 25 al 40%, y se debe secarse considerablemente antes de que pueda cosecharse y colocarse en un almacenamiento convencional. Para una cosecha con alta humedad del grano o una cosecha temprana con secado artificial, el sorgo se puede cosechar en cualquier momento después de la madurez fisiológica (Vanderlip 1998). La madurez fisiológica puede determinarse por las manchas oscuras en la semilla en su inserción con la planta. Los sorgos cultivados maduran entre 100 y 140 días, dependiendo de la variedad y fecha de siembra (Figura 8).

Resumen de las Características del sorgo dulce

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es una planta C_4 que tiene características muy interesantes: (i) su ciclo de crecimiento es corto (unos cuatro meses), (ii) el cultivo se puede establecer a partir de semillas, (iii) su producción puede ser completamente mecanizada,

(iv) los cultivares dulces producen azúcar en el tallo, y el almidón en el grano, (v) tiene una alta eficiencia en el uso de agua y nutrientes, (vi) el bagazo producido a partir de sorgo dulce tiene un alto valor biológico cuando se utiliza como forraje y buena combustión cuando se utilizan para la cogeneración (vii) cuenta con una amplia capacidad de adaptación al medio ambiente.

Diversidad genética para características útiles

El género *Sorghum* comprende una alta diversidad genética (Assar *et al* 2005; Uptmoor *et al.* 2003), y por lo tanto, existe el potencial para el mejoramiento genético y aumento de la



Figura 5: Diversidad en color y forma de panículas, lo cual muestra la enorme variación genética de las distintas especies de *Sorghum* (©Braconnier)

productividad. Diversidad de colores y formas muestra la enorme cantidad de variación genética en las especies de *Sorghum* (Figura 5). Los sorgos cultivados se pueden dividir en tres categorías principales basadas en la utilización del producto final: el sorgo de grano de almidón, sorgo dulce de azúcar y / o grano y sorgo biomasa para la producción de biomasa. Prácticamente no existen barreras / fronteras biológicas o taxonómicas entre estas formas cultivadas para la hibridación ya que todos ellos pertenecen a la misma especies.

La domesticación temprana de sorgo se asoció con el cambio de semillas pequeñas, dehiscencia y panículas abiertas a semillas grandes, no dehiscentes y panojas más compactas (Dhillon *et al.* 2006). Recientemente, los fitomejoradores se centran en mejorar el sorgo para servir como alimento, pienso, combustible (Laopaiboon *et al.* 2007; Tarpley y Vietor 2007; Vermerris *et al.* 2007), dependiendo de las necesidades locales de cada país (Figura 6). Esto implica mejorar los caracteres tales como el desempeño del rendimiento y la estabilidad, la resistencia a plagas y patógenos, cualidades de grano, tallos y otros.



Figura 6: Campo de Mejoramiento para sorgo de grano en Sudáfrica (©Rutz)



Figura 7: Nervadura café en hoja de sorgo dulce
(© Braconnier)

Los fitomejoradores han aprovechado genes para resistencia a insectos y enfermedades (Gowda *et al.* 1995), tolerancia a la sequía (Tsago *et al.* 2013), adaptación de la fotosensibilidad a las condiciones climáticas (Obilana 1985), la duración del período de crecimiento, la respuesta al bajo nivel de nitrógeno (Miri y Rana 2012), la acumulación de azúcar en el tallo para el jarabe y etanol (Zheng 2011), el alto rendimiento de grano para la alimentación (Qazi *et al.* 2012) y altos rendimientos de biomasa para su uso como materia prima para ganado o biocombustibles de segunda generación (Srinivasa Rao *et al.* 2012).

Con el fin de aumentar el rendimiento de biomasa, otro rasgo importante que fue aprovechado es la disponibilidad de mutaciones de nervadura café (*bmr*) que reduce el contenido de lignina y aumenta la digestibilidad del forraje en animales (Cherney *et al.* 1991; Oliver *et al.* 2005; Srinivasa Rao *et al.* 2010), y favorece una degradación más eficiente de la biomasa para biocombustibles de segunda generación (Dien *et al.* 2009).

Las mutaciones de Nervadura café (*bmr*) en el sorgo están fenotípicamente caracterizadas por la presencia de los tejidos vasculares de color marrón en las láminas de la hoja y la vaina (Figura 7), así como en el tallo. El valor de una planta de cultivo como forraje está determinada principalmente por la degradabilidad del tejido y la producción de biomasa vegetal por unidad de tiempo y unidad de área. El aumento de la digestibilidad y la degradación de la materia prima se correlacionan negativamente con la lignina (Blummel y Rao 2006). Por lo tanto, la lignina se considera que limita la velocidad en este proceso.

El proyecto SWEETFUEL se enfoca en la mejora de cultivares e híbridos de sorgo. De este modo, los ideotipos objetivo dependen del ambiente de destino y del proceso de conversión de los biocombustibles (Janssen *et al.* 2010). En seguida se presentan los objetivos considerados:

En los ambientes templados (por ejemplo, Europa), el objetivo general es el desarrollo de híbridos de sorgo cuyos ideotipos tienen como objetivo la producción alta de biomasa, buena adaptación a las bajas temperaturas y buena digestibilidad (bajo contenido de lignina, con la característica *bmr*), adecuado para la producción de bioetanol de 2^a generación o la producción de biogás. Esto es importante con el fin de satisfacer la política de biocombustibles de Europa en beneficio de los agricultores y agro-industriales y con respecto a las preocupaciones ambientales.

En los ambientes semiáridos tropicales (por ejemplo, la India), el objetivo general es el desarrollo de nuevas líneas o híbridos con ideotipos cuyo objetivo sea la producción de sorgo con doble propósito (grano + azúcares), con tallos jugosos que tienen alto conte-

nido de azúcar total y buena digestibilidad, apto para bioetanol de 1ª generación, la buena producción de grano apto para la alimentación humana o animal, alta producción de biomasa con una circunferencia del tallo > 2,5 cm, una mayor resistencia a la sequía, con buena adaptación a climas lluviosos y/o secos como en la India y la mejora de la digestibilidad del bagazo para su uso como forraje.

En las sabanas tropicales (por ejemplo, Brasil) con suelos ácidos o de baja fertilidad, el objetivo general es el desarrollo de nuevas líneas o híbridos de sorgo dulce con ideotipos para la producción de sorgo con tallos jugosos que tienen alto contenido de azúcares totales, apto para bioetanol 1ª generación, y una buena adaptación a suelos marginales (acidez, alto contenido de Al, bajo contenido de P).

Amplitud de la Adaptación Agroecológica

El sorgo dulce tiene una amplia adaptación agroecológica. Puede cultivarse entre las latitudes 45°N y 45°S, a ambos lados del ecuador en elevaciones entre el nivel medio del mar y 1500 msnmm. En la mayoría de los países del este de África se cultiva entre las altitudes de 900-1,500 msnmm y variedades tolerantes al frío se cultivan entre 1,600 y 2,500 msnmm en México. El sorgo dulce puede tolerar un rango de temperatura de 12-37 °C, con una temperatura óptima para el crecimiento y la fotosíntesis de 32-34 °C y una duración del día de 10-14 h. La precipitación óptima oscila entre los 550 hasta 800 mm con una humedad relativa que varía de 15 a 50% (Srinivasa Rao y Kumar 2013).

El sorgo dulce puede adaptarse a una amplia gama de tipos y condiciones del suelo. Se puede cultivar en alfisoles (rojo) o vertisoles (barro negro arcilloso) y toleran un amplio rango de pH, que oscila entre 5.5 y 8.5 (Du Plessis 2008). Este amplio espectro convierte al sorgo en un buen candidato para sembrarse en suelos ácidos, por lo general asociados con la deficiencia de fósforo (P) y toxicidad por Aluminio (Al).

El sorgo es susceptible a inundaciones sostenidas, pero se ha observado que sobrevive al anegamiento temporal mucho mejor que el maíz (Srinivasa Rao y Kumar 2013). Si la planta de sorgo dulce se ve inmersa en inundaciones durante una semana, puede volver a crecer rápidamente después de la inundación.

Tolerancia a la Sequía

El sorgo dulce, llamado camello entre los cultivos, sobrevivirá con un suministro de agua menor de 300 mm en un ciclo de 100 días, mientras que responde favorablemente con precipitaciones adicionales o agua de riego. Por lo general, las necesidades del sorgo dulce, oscilan entre 550 a 800 mm de agua (lluvia y/o riego) para lograr buenos rendimientos, es decir, 50 a 100 t/ha de biomasa aérea total (peso fresco). Aunque el sorgo es un cultivo de secano, es crítica una alta disponibilidad de humedad para el crecimiento de la planta para obtener altos rendimientos. La principal ventaja del sorgo es que puede quedar latente especialmente en fase vegetativa en condiciones adversas y puede reanudar el crecimiento después de una sequía relativamente severa. La sequía temprana antes de la iniciación de la panoja detiene el crecimiento y la planta se mantiene en periodo vegetativo. La producción de hojas y flores se reanuda, cuando las condiciones sean de nuevo favorables para el crecimiento. La presencia de sequía a mitad de ciclo detiene el desarrollo de la hoja. Durante las condiciones de sequía los azúcares solubles

mantienen el nivel de turgencia en un nivel razonable. En diferentes genotipos de sorgo dulce, los azúcares reductores y las proteínas son indicadores de la tolerancia/resistencia a la sequía (Erdei *et al.* 2009).

Uso eficiente de agua y radiación

La eficiencia del uso de agua (WUE, por sus siglas en inglés) se define como los mm de agua evapotranspirada por el cultivo por kg de biomasa seca encima del suelo o biomasa producida por unidad de agua consumida (Dercas y Liakatas 2007). La eficiencia en el uso de radiación (RUE, por sus siglas en inglés) es la eficiencia de conversión de radiación interceptada a materia seca expresado en g / MJ (Monteith, 1993).

La eficiencia del sorgo dulce (más que el maíz y otros cultivos C_4) (Gosse 1996) transforma la radiación interceptada ($RUE = 3,7 \text{ g/m}^2$ de materia seca por MJ/m^2 de radiación fotosintéticamente activa absorbida) y el agua utilizada en materia seca ($WUE = 193 \text{ mm}$ de agua/kg de materia seca producida o 5.2 g de materia seca/kg de agua consumida).

Se reportó que la producción de biomasa seca aerea de las plantas de sorgo dulce sin escases de agua presentó un alto potencial de productividad entre los cultivos C_4 (Curt *et al.* 1998). Bajo escasez de agua, la eficiencia en el uso de radiación puede ser significativamente menor. La eficiencia en la utilización de la radiación parece estar relacionada de manera lineal con el consumo de agua. Las plantas estresadas (probablemente con excepción de individuos severamente estresados) parecen utilizar el agua disponible de manera más eficiente que las plantas no estresadas. La pendiente de la recta que relaciona la materia seca producida y agua evapotranspirada aumenta tan pronto como se detecta el estrés hídrico (Dercas y Liakatas 2007).

Alta eficiencia en la utilización de nitrógeno

La alta eficiencia de uso de nitrógeno (NUE por sus siglas en inglés) es una característica deseable en cultivos propios para la agricultura. NUE puede definirse de muchas formas, pero de manera simple, es el nitrógeno exportado desde el suelo a los diferentes órganos de la planta sobre el nitrógeno aplicado. Ra *et al.* (2012) calcularon la eficiencia de uso de nitrógeno (NUE) de varios cultivos energéticos, incluyendo el sorgo, caña de azúcar y el maíz cultivado con una aplicación base de 72 kg/ha de N. Los resultados mostraron que, bajo densidades de población convencionales, el sorgo tuvo el valor más alto de NUE, con un valor de 120.8 kg/kg , comparado con el maíz y la caña de azúcar, los cuales presentaron valores de NUE de 88.1 y 112 kg / kg , respectivamente.

Tolerancia a la salinidad y alcalinidad

El sorgo dulce proporciona rendimientos adecuados incluso cuando se cultivan bajo estrés provocado por salinidad del suelo y riego reducido. Las plantas de sorgo dulce producen jugo suficiente, azúcares totales y rendimientos de etanol en suelos que presentan salinidad de hasta 3.2 dS/m , incluso si las plantas reciben solo el 50-75% del riego normalmente aplicado al sorgo. Por lo tanto, el sorgo dulce puede ser viable como un cultivo potencial en condiciones de alta salinidad del suelo y de riego reducido, especialmente en áreas semi-salinas y semiáridas, donde el agua de riego es limitada durante el desarrollo del cultivo (Vasilakoglou *et al.* 2011). En suelos salino-alcálinos, Xie *et al.* (2012)

encontraron que el alto contenido de azúcar y la producción de etanol de sorgo dulce pueden estar presentes. Por lo tanto, teniendo en cuenta la competencia entre cultivos alimenticios y cultivos energéticos, se puede sacar provecho al cultivar sorgo dulce permanentemente en condiciones salino-alcálinas donde muy pocos cultivos pueden crecer.

Sensibilidad al Fotoperíodo

El sorgo es una planta de día corto, lo que significa que la planta requiere de días cortos (noches largas) antes de pasar a la etapa reproductiva. Plantas de sorgo son muy sensibles al fotoperíodo durante la iniciación floral. El fotoperíodo óptimo, que inducirá la formación de flores, está entre 10 y 11 horas. Las variedades tropicales suelen ser más sensibles al fotoperíodo que las variedades precoces, de ciclo corto (Du Plessis 2008).

La mayoría de los híbridos de sorgo dulce son relativamente menos sensibles al fotoperíodo. Los agricultores tradicionales, en particular en África Occidental, utilizan variedades sensibles al fotoperíodo. Con tipos sensibles al fotoperíodo, la floración y la maduración del grano se producen casi durante los mismos días del calendario, independientemente de la fecha de siembra, de modo que incluso con el retraso en la siembra, las plantas maduran antes de que se haya agotado la humedad del suelo al final de la temporada (Vaksmann *et al.* 1996).

Ventajas en comparación con Caña de Azúcar

El Cuadro 1 muestra una comparación entre dos cultivos productores de azúcar (caña de azúcar y sorgo dulce) en lo que respecta a las características para la producción de etanol. Este cuadro refleja claramente que el sorgo dulce presenta mayores ventajas para ser utilizado como un cultivo bioenergético debido a los menores requerimientos que presenta. Además, el proceso de producción de etanol a partir de sorgo dulce es

Cuadro 1: Comparación entre caña de azúcar y sorgo dulce (Almodares y Hatamipour 2011)

	Caña de azúcar	Sorgo dulce
Duración del ciclo	Alrededor de 7 meses	Alrededor de 4 meses
Periodo de Crecimiento	Solo un período	Un período en climas templados, 2 o 3 en climas tropicales
Requerimientos de Suelo	Se desarrolla bien en suelos con buen drenaje	Se desarrolla bien en cualquier suelo con buen drenaje a excepción de suelos arenosos
Manejo de agua	36,000 m ³ /ha	12,000 m ³ /ha
Manejo del cultivo	Requiere un buen manejo	Se requiere poco fertilizante; manejo de plagas y enfermedades menos complejo; fácil manejo
Rendimiento por ha	70-80 tons	54-69 tons
Contenido de azúcar en base seca	10-12%	7-12%
Rendimiento de azúcar	7-8 tons/ha	6-8 tons/ha
Producción de etanol directamente del jugo	3,000-5,000 L/ha	3,000 L/ha
Tipo de cosecha	Mecánica	Muy sencilla, puede ser manual o mecánica

ecológicamente amigable en comparación con el que se realiza con la melaza y además la calidad de la combustión del etanol es superior pues libera menos azufre que el de la caña de azúcar y de alto octanaje.

Cultivo

Preparación del suelo

Las semillas de sorgo necesitan un suelo relativamente cálido y húmedo bien provisto de aire y suficientemente fino para proporcionar un buen contacto semilla-suelo para la germinación óptima y rápida. Existen diferentes sistemas de labranza y siembra que puede utilizarse para obtener estas condiciones. Estos sistemas pueden implicar la labranza primaria o secundaria o cero labranza antes de la siembra. Una cama de siembra ideal debe cumplir con estos objetivos:

- controlar malezas,
- conservar la humedad,
- preservar o mejorar la capa cultivable,
- control de viento y erosión del agua, y
- ser adecuada para la siembra y cultivo con el equipo disponible.

Uno de los objetivos en la preparación de la cama de siembra es proporcionar medios de producción de cultivos para hacerlos rentables y reducir al mínimo la erosión del suelo por el viento y el agua. A los sistemas de labranza y siembra que cumplan con este objetivo se refieren normalmente como los sistemas de labranza de conservación (Vanderlip 1998).

Siembra

La densidad de siembra depende de la variedad, precocidad, tamaño de la planta, condiciones ambientales, etc) y varía entre 110,000 a más de 400,000 plantas por ha. Bajo condiciones tropicales, estas cifras son menores. La siembra en hileras más anchas se recomienda para las zonas que presentan una baja precipitación y en suelos con baja capacidad de retención de agua. La profundidad de siembra también está determinada por el tipo de suelo. En suelos pesados, la profundidad de siembra no debe ser mayor de 25 mm, mientras que en suelos ligeros la profundidad puede ser de hasta 50 mm. Es importante que el suelo que rodea la semilla sea firme para garantizar la rápida absorción de agua y, finalmente, la germinación (Sweethanol 2011b).

Teniendo en cuenta la duración del ciclo y el hecho de que la etapa de acumulación de azúcar se ve afectada por las bajas temperaturas, la siembra en climas mediterráneos se debe realizar a principios de mayo, de modo que el sorgo pueda ser capaz de completar su ciclo.

En Brasil se está proponiendo el sorgo dulce para sembrarse al inicio de la temporada de lluvias en áreas de renovación de la caña de azúcar para incrementar el período de funcionamiento de las grandes destilerías por hasta 100 días. Por lo tanto, La siembra tiene lugar entre noviembre y diciembre y la cosecha entre marzo y abril. La densidad de siembra es de entre 120,000 a 130,000 plantas por ha (Mantovani *et al.* 2012) (Figura 8).



Figura 8: Calendario de Producción de Bioetanol en Brasil (© EMBRAPA)

En la India, el sorgo dulce se puede cultivar durante la temporada de lluvias, durante la época seca y la temporada de verano, dependiendo de la disponibilidad de fuentes de humedad/riego del suelo y con los regímenes de temperatura adecuados (Reddy 2013). La densidad de siembra también varía según la temporada. Para la siembra de verano se encuentra entre 80,000 y 160,000 plantas por ha y es menor en la temporada de lluvias y en la temporada seca del año.

Temporada de lluvias (Junio-Octubre): La siembra debe realizarse inmediatamente después del inicio de los monzones, preferentemente desde la primera semana de junio hasta la primera semana de julio (en función de la aparición de los monzones).

Temporada seca o posterior a la época de lluvias (Octubre-Febrero): La siembra debe hacerse a partir de la última semana de septiembre hasta finales de octubre. La temperatura de la noche debe estar por encima de los 15° C al momento de la siembra. Se recomienda el riego al cultivo si no hay lluvias en la época de la siembra para asegurar una germinación y establecimiento uniforme. La siembra deberá realizarse bajo el método de surcos para conservar el agua de riego de manera semejante a la temporada de lluvias.

Cultivo de verano: La siembra se realiza a partir de mediados de Enero a finales de Febrero en condiciones de riego suplementario. La temperatura de la noche debe estar por encima de 15° C al momento de la siembra. La siembra de verano debe realizarse en surcos, lo que permitirá un excelente rendimiento de forraje, suministrado agua de riego si se encuentra disponible.

En Europa central, no se recomienda sembrar cuando las temperaturas sean superiores a 12° C y por lo general es antes de mediados de mayo. La densidad de siembra varía dependiendo de la variedad y oscila entre 240,000 (*Sorghum bicolor*) a 350,000 (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanese*) plantas por ha.

Fertilización

El sorgo es considerado muy eficiente en la utilización de nutrientes del suelo a causa de un gran sistema radicular fibroso; Sin embargo, al igual que otros cultivos, necesita los nutrientes adecuados para producir buenos rendimientos. Respuestas rentables a la fertilización se puede observar en muchos tipos de suelos. Para evaluar la cantidad correcta de fertilizante que se aplicará para obtener un rendimiento óptimo, se debe muestrear y analizar el suelo siguiendo las recomendaciones de un laboratorio de suelos acreditado, prosiguiendo a su aplicación en forma inmediata (Du Plessis 2008).

En los lugares donde la fertilidad del suelo oscila entre baja y moderada, las necesidades de fertilización son alrededor de: 100-150 kg N, 60-100 kg P_2O_5 y 60-100 kg K_2O por hectárea. Se recomienda que la aplicación de nitrógeno se realice en dos tiempos: antes de la siembra y de 20 a 30 días después de la emergencia (Sweethanol 2011).

Plagas de la planta y su control

Las enfermedades del sorgo, al igual que los de otros cultivos, varían en gravedad de un año a otro y de una localidad a otra, en función del ambiente que lo rodea, los organismos causales y la resistencia de la planta huésped. La erradicación total de la enfermedad en el sorgo no es económicamente viable, por lo que los productores deben tratar de minimizar su daño a través de un sistema de manejo integral de plagas. Para minimizar las pérdidas por plagas, se puede seguir diferentes opciones tales como: siembra de híbridos resistentes; proporcionando las condiciones óptimas de cultivo; rotando con otros cultivos; eliminando residuos infestados; siembra de semillas libres de enfermedades; preparación adecuada del suelo y aplicación precisa de herbicidas, insecticidas y fungicidas. Las plagas del sorgo son similares a las del maíz y la caña de azúcar en las zonas donde ambos se cultivan extensivamente.

Malas Hierbas

Desde las primeras etapas del cultivo, es decir, desde la siembra hasta el cierre del dosel, el sorgo es muy sensible a la competencia por malezas. Muchas malezas pueden infestar al sorgo. Entre las malezas más importantes, que puede causar un daño grave en algunas regiones del mundo, es el parásito de la raíz *Striga* spp. o hierba bruja, que se produce principalmente en condiciones de cultivo de bajos insumos. La mayor parte del daño se hace antes de que la planta parásito emerja del suelo. Los síntomas incluyen el marchitamiento, enrollamiento y escoriación de la hoja, a pesar de que el suelo puede tener agua suficiente. Las semillas son pequeñas y se diseminan por el viento, el agua y los animales y permanecen viables en el suelo de 15 a 20 años. El control de malezas durante las primeras 6 a 8 semanas después de la siembra es de vital importancia, ya que las malezas compiten vigorosamente con el cultivo por nutrientes y agua durante este período. La rotación con algodón, cacahuete, garbanzo y guandú (*Cajanus cajan*) reducirá la incidencia de *Striga*. La eliminación de plantas de manera manual antes de la floración puede ser útil.

Para otras especies de malezas, el control incluye una eliminación mecánica ya sea manual o a través de implementos, o utilizando el arado en el suelo durante el invierno o principios de primavera; aunque el control también se puede realizar mediante la apli-

cación de productos químicos en forma líquida, granulado o gaseosos con el fin de matar semillas germinando o malas hierbas en crecimiento. Los campos muy infestados con zacate Johnson y pasto Bermuda no deben sembrarse con sorgo (Du Plessis 2008).

Enfermedades Bacterianas y Fúngicas

Existen cuatro tipos de enfermedades que atacan el sorgo: Los que provocan la pudrición de la semilla o la muerte de las plántulas; los que atacan las hojas y panojas evitando la formación normal del grano, y finalmente los que causan la pudrición de la raíz o del tallo evitando el desarrollo normal de la planta.

La enfermedad más común conocida que ataca al sorgo y puede causar pérdidas económicas es la Antracnosis. Esta enfermedad es causada por el hongo *Colletotrichum graminicola*, la antracnosis es de una de las enfermedades más importantes del sorgo en el mundo (Cardwell 1989). Infecta todas las partes aéreas del huésped (el tallo, hojas, pedúnculos, panoja y grano) y se desarrolla tanto en tejido vivo o muerto. Los síntomas de la enfermedad incluyen daño foliar, pudrición del tallo y de la panoja y la antracnosis del grano. Los síntomas pueden variar debido a las diferencias en la virulencia de patógenos o la resistencia del huésped, o cambios en el estado fisiológico del huésped después de la infección. La forma más común y grave de la enfermedad es la antracnosis foliar (Figura 8). La infección aparece primero en las hojas en forma de manchas pequeñas, circulares o elípticas, que más tarde se agrandan y pueden unirse hasta involucrar grandes áreas de la hoja. La nervadura central de la hoja, que está infectada comúnmente junto con la lámina de la hoja, es a menudo notablemente descolorida. Posteriormente, los centros de las manchas foliares se desvanecen a un color gris-marrón; un examen con lupa revela la presencia de numerosos puntitos negros o motas con pelos cortos y rígidos. Esos son los cuerpos fructíferos de los hongos, los cuales, en condiciones de humedad, producen masas de esporas rosáceas. Las esporas se dispersan por la lluvia y el viento a otras hojas, donde empiezan las nuevas áreas de infección (Smith y Frederiksen, 2000).

La antracnosis puede reducir el rendimiento de grano y forraje de cultivares susceptibles hasta en un 50% y más (Harris et al 1964; Harris y Sowell 1970). La infección por antracnosis causa una reducción significativa en el rendimiento de grano a través de la reducción del peso de la semilla y el aborto de granos (Thomas et al. 1996). La defoliación debido a la antracnosis reduce el valor de las plantas para el forraje y puede reducir el contenido de azúcar de los tallos de las variedades muy susceptibles. También puede reducir la proporción de sacarosa para invertir azúcares.

Un manejo adecuado y la rotación de cultivos evitando la siembra de sorgo en campos cosechados el año anterior con pasto Sudán, sorgo o zacate Johnson deben de reducir las pérdidas causadas por la antracnosis.

La resistencia de la planta hospedante es el método más económico para el manejo exitoso de la enfermedad. La disponibilidad de fuentes de resistencia es un requisito previo para el mejoramiento de cultivares de sorgo adaptados, productivos y resistentes (Hess et al. 2001). El Cuadro 2 enlista otras enfermedades que pueden atacar al cultivo de sorgo.



Figura 9: Antracnosis de la hoja (© Viana Cota)

Cuadro 2: Enfermedades patogénicas que pueden atacar al cultivo de sorgo

2. Patógenos bacteriales que pueden atacar las hojas			
	Enfrmedad y patógeno	Síntomas	Control
 © Cunfer	Estriado Bacteriano <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>Holcicola</i>	Las lesiones son angostas y elongadas entre las venas de la hoja, comunmente extendiéndose a lo largo total de la vena. Las lesiones inician como una banda roja delgada a lo largo de la vena y después se extienden hasta producir un bordo rojizo o negro y un centro gris del tejido muerto. Masas de células de la bacteria en las lesiones se exudan hacia la superficie cuando las hojas estan húmedas.	El control de estas enfermedades incluye la rotación de cultivos, sembrando variedades resistentes, saneamiento del terreno, tratamiento de la semilla y eliminando plantas infectadas sobre el suelo y plantas infectadas que permanecen en el invierno.
 © Wrather	Mancha oscura <i>Pseudomonas andropogonis</i>	La bacteria causa bandas delgadas amarillentas. Eventualmente, manchas gruesas de color rojo-café aparecen en las zonas dañadas, las cuales se ensanchan formando manchas ovales con centros café pálido y delgados y margenes rojos.	
 © Howard	Mancha bacteriana. <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Syringae</i>	La mancha bacteriana, causada por <i>Pseudomonas syringae</i> , se caracteriza por pequeños e irregulares formas de lesions cafés con margenes oscuros.	

3. Hongos patógenos que pueden atacar las hojas


	Enfermedad y patógeno	Síntomas	Control
 <p>© Luciana Viana Cota</p>	Tizón de la hoja: <i>Exserohilum turcicum</i>	Manchas pequeñas de color rojizo o café claro que pueden ampliar a lesiones elípticas de color rojizo, púrpura o color canela. La esporulación sobre las lesiones a menudo les da un aspecto gris o verde oliva oscuro en la superficie.	Eluso de cultivares resistentes y por rotación. Cultivares e híbridos de alto rendimiento y resistentes se han identificados y están a disposición de los productores.
 <p>© Luciana Viana Cota</p>	Cercospora mancha foliar	Manchas pequeñas circulares o elípticas de color púrpura o rojo oscuro. Posteriormente, el centro se convierte en marrón claro o café y las manchas se observan alargadas con masas de esporas de color gris que cubre los puntos.	Eluso de cultivares resistentes. La mayoría de las variedades tienen una tolerancia adecuada para esta enfermedad. Rotación de cultivos, además es necesario evitar t r a b a j a r cuando las plantas están mojadas.
 <p>© Wrather</p>	Mancha foliar circular <i>Gloeocercospora sorghi</i>	Poco o moderada importancia. Se presentan lesiones circulares muy grandes conformadas de anillos alternados de color paja y púrpura.	La rotación de cultivos y el manejo para el control de malezash o s p e d a n t e s susceptibles. Los cultivares e híbridos que son algo resistentes están disponibles para los productores.
 <p>© Cunfer</p>	Mancha rugosa <i>Ascochyta sorghina</i>	Manchas de color claro en al comienzo de la infección que posteriormente se convierten en manchas negras rugosas provocadas por los cuerpos fructíferos rugosos de color negro (picnidios).	El Sorgo no debe cultivarse en terrenos donde la enfermedad se presentó en el ciclo anterior. Se aconseja el tratamiento de semillas y eluso de variedades resistentes.
 <p>© Luciana Viana Cota</p>	Raya tiznada <i>Ramulispora sorghi</i>	Las lesiones son de forma elíptica. Presenta coloraciones crema en el centro y color canela y un margen de color púrpura o marrón rojizo. Un halo amarillo muy amplio rodea la lesión. Lesiones maduras se vuelven de color negro.	Casi todos los híbridos de sorgo presentaran algún daño foliar debido a este patógeno. El mejor método para reducir su incidencia es la rotación.

	<p>Roya <i>Puccinia purpurea</i></p>	<p>Pústulas pequeñas abultadas o ampollas que se rompen y liberan muchas esporas de color marrón rojizo. Estas pústulas se producen tanto en las superficies de las hojas superiores e inferiores.</p>	<p>Se recomienda el uso de variedades resistentes, así como la eliminación de los residuos de cosecha y de huéspedes secundarios.</p>
	<p>Mildew vellosa: <i>Peronosclerospora sorghi</i></p>	<p>Los síntomas de infecciones sistémicas incluye clorosis en las hojas y plantas enanas y normalmente la muerte de las plantulas. Los primeros síntomas de infección, se muestra clorosis en las partes bajas de las laminas de las hojas. En condiciones frescas y húmedas, en la superficie inferior de las hojas cloróticas se producen abundantes esporas (conidias) de color blanco, de crecimiento vellosa. Conforme la planta crece las hojas nuevas muestran franjas paralelas alternadas de tejido de color blanco y verde.</p>	<p>Las medidas de control que se deben de considerar son variedades de plantas resistentes, rotar el cultivo con algodón, trigo, soya o un cultivo forrajero y remover y eliminar las plantulas enfermas para prevenir la dispersión de la enfermedad.</p>

Hongos patógenos que pueden atacar a panoja o panícula

	Enfermedad y patógeno	Síntomas	Control
	<p>Moho del grano o panoja <i>Fusarium moniliforme</i>, y otras spp, <i>Curvularia lunata</i>, <i>Phoma sorghina</i>, <i>Helminthosporium</i> spp. y <i>Alternaria</i> spp.</p>	<p>En las panojas infectadas por <i>Fusarium</i>, las semillas son de color rosa, naranja o blanco y por aquellos infectados por <i>Curvularia</i>, <i>Alternaria</i> o <i>Helminthosporium</i> las semillas son de color negro.</p>	<p>El moho del grano puede evitarse ya sea retrasando las fechas de siembra o sembrando variedades de ciclo mediano a tardío, de tal manera que el llenado del grano y estados de madurez ocurran después del final de las lluvias. La resistencia de la planta hospedante es el método más preferido de control.</p>
	<p>Ergot <i>Claviceps Africana</i></p>	<p>El hongo normalmente sólo infecta las flores no fertilizadas y la infección resulta en la producción de un exudado con azúcar (honeydew). Después de la madurez, la semilla infectada produce un cuerno negro alargado. Se puede reducir el rendimiento de los cultivos, debido a problemas de cosecha con melaza, contaminan el grano y puede causar problemas de toxicidad en la alimentación del ganado con granos muy contaminados.</p>	<p>El control de la enfermedad es posible mediante la rotación y por medio de la siembra de cultivares y híbridos resistentes a la infección.</p>

	<p>Tizon del grano cubierto <i>Sporisorium sorghi</i></p>	<p>En panojas donde se presenta la infección se observa la formación de agallas, en forma cilíndrica agrandada o agallas tiznadas en forma de cono, las cuales se forman en lugar de los granos. Al principio, las agallas están cubiertas con una membrana gris clara o marrón que posteriormente se puede romper y liberar las esporas de color marrón oscuro. Las plantas afectadas parecen normales a excepción de las panojas tizonadas.</p>	<p>El tratamiento de semillas y el uso de semillas de variedades resistentes son los mas eficientes métodos de control para todas las enfermedades relacionadas con tizon.</p>
	<p>Tizón del grano perdido <i>Sporisorium cruenta</i></p>	<p>Las agallas formadas por este hongo son largas y puntiagudas. La membrana delgada que se encuentra sobre estas por lo general se rompe poco después de que las agallas llegan a su tamaño completo. La mayoría de las esporas color marrón oscuro se mueven con el viento dejando una estructura larga, oscura, curva y puntiaguda, llamada columela, en la parte central de lo que fueran las agallas</p>	
	<p>Tizón de la panoja <i>Sporisorium reiliana</i></p>	<p>Es distinguible de los carbones de la semilla, ya que destruye la panoja entera, transformándola en una gran masa de clamidosporas pulverizadas de color marrón oscuro. Este hongo se transporta en el suelo y el sorgo cultivado a partir de semillas sanas sembradas en suelos infestados puede ser atacado.</p>	

 <p>© ICRISAT</p>	<p><i>Sporisorium ehrenbergii</i></p>	<p>elongado, cilíndrico, ligeramente curvado, con una membrana delgada blanquecina que se rompe para liberar la masa polvorienta oscura de esporas redondas que se transportan fácilmente por el viento. Los soros se distribuyen desuniformemente en la panoja en forma diferente a los soros del tizon cubierto.</p>	<p>el uso de semillas de variedades resistentes son los mas eficientes métodos de control para todas las enfermedades relacionadas con tizon.</p>
--	---------------------------------------	--	---

Patógenos que pueden atacar la raíz y el tallo

	Enfermedad y patógeno	Síntomas	Control
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Pudrición carbonosa <i>Macrophomina phaseolina</i> (o <i>Sclerotium bataticola</i>)</p>	<p>Es la más destructiva de las pudriciones del tallo. Es impredecible y más o menos esporádica en su incidencia. Uno de los síntomas de la enfermedad es el acame; Sin embargo, el diagnóstico de la infección se caracteriza por un tallo de apariencia fibrosa y seca cerca de la línea del suelo (en el pliegue en plantas acamadas) y la presencia de esclerocios negros en las zonas afectadas.</p>	<p>La incidencia de la pudrición carbonosa puede minimizarse mediante el mantenimiento de la humedad del suelo durante las etapas de post-floración. Los altos niveles de nitrógeno y los bajos niveles de potasio son condiciones que se deben evitar. Plantas estériles son esencialmente inmunes.</p>
 <p>© Wrather</p>	<p>Pudrición del tallo <i>Fusarium thapsinum</i></p>	<p>La pudrición del tallo por <i>Fusarium</i> hace que la médula de la parte inferior del tallo aparezca en color rojo mientras la parte exterior de este permanece verde. El tejido de la médula generalmente permanece intacto, a diferencia de lo que se presenta en la pudrición carbonosa. Las plantas pueden morir o presentar acame.</p>	<p>Se recomienda sembrar en suelo fértil, con semilla que produzca plantas con fuerza en el tallo, evitar altas densidades de plantas, a menos que exista disponibilidad de riego. Evite condiciones de estrés de sequía a través de la labranza reducida o la aplicación de riegos.</p>

Enfermedades Virales


El virus que ha sido identificado por causar lesiones al sorgo es el virus del mosaico enanizante del maíz (MDMV), pero este sólo se presenta en los campos donde el zacate Johnson está presente. El virus pasa el invierno en los rizomas subterráneos del zacate Johnson. Los brotes producidos a partir de estos rizomas en primavera serán infectados y el virus se puede mover por áfidos (pulgonos de la hoja del maíz y los áfidos verdes) de los brotes de otras plantas susceptibles, como el sorgo y el maíz. Las plantas infectadas con MDMV exhiben un moteado distintivo de las hojas. Cuando se comparan con las hojas sanas, las hojas enfermas son de color amarillo con pequeñas islas de color verde claro. Estos síntomas son más evidentes en hojas jóvenes que en hojas viejas. Los síntomas generalmente son menos visible en olantas en estado de embuche. El moteado es el síntoma más común de la hoja, pero se pueden presentar otros síntomas. Cuando las temperaturas bajan más de 13°C, las hojas infectadas pueden tornarse rojas y posteriormente desarrollar rayas café alargadas con márgenes rojos. Plantas severamente infectadas frecuentemente mueren, mientras que las que sobreviven se achaparran y no producen una panoja normal.

Los procedimientos de control consideran generalmente la siembra de variedades tolerantes y a través de la eliminación de los rizomas del zacate Johnson en el campo. La eliminación de áfidos que propagan la enfermedad puede no reducir las infecciones por MDVD, por lo que para el manejo de este virus no se recomienda el uso de insecticidas.



Plagas de Insectos

Una amplia variedad de plagas de insectos puede afectar el sorgo dulce a lo largo de su ciclo de vida. La presión de los insectos depende de la ubicación, el clima y la etapa de crecimiento del cultivo. Los insectos más comunes que pueden atacar el sorgo se pueden agrupar en cuatro categorías: Los que atacan las semillas y las raíces; insectos y ácaros que atacan las hojas y cogollos de la hoja; barrenadores del tallo e Insectos que atacan las panículas (Cuadro 3).


Cuadro 3: Plagas de Insectos que atacan al sorgo

1. Insectos que atacan la semilla y las plántulas			
	Nombre	Síntomas	Control
	Gusanos de Alambre: <i>Aeolus</i> , <i>Eleodes</i> , <i>Conoderus</i> spp	Se alimentan de semillas dañadas y en menor medida de las raíces de las plántulas. Las larvas ahuecan las semillas provocando que estas no germinen reduciendo así la población de plantas. Una evidencia del daño provocado por este insecto es la presencia de plantas no uniformes con retraso de crecimiento y plántulas débiles.	Se recomienda sembrar el sorgo en campos donde no se haya sembrado algún tipo de zacate en el año anterior, aplicar insecticida a las semillas y comprar semilla ya tratada con un insecticida sistémico. Cuando el gusano de alambre es abundante, se debe de aplicar un insecticida al suelo al momento de la siembra.


© Viana

 <p>© Wild</p>	<p>Hormiga roja de fuego: <i>Solenopsis invicta</i></p>	<p>Se alimentan de semillas del sorgo. En ocasiones dañan las raíces y hojas jóvenes de la germinación de las semillas. Las hormigas obreras mascan a través de la fina cubierta de la semilla y elimina el embrión (germen). Este daño resulta en la pérdida de la germinación de las semillas, causando la reducción en la densidad de población.</p>	<p>Se recomienda sembrar sorgo en campos donde no se haya sembrado algún tipo de zacate, asegurar una germinación rápida, implementar un trabajo extensivo en la preparación del suelo y utilizar semillas tratadas con insecticida.</p>
 <p>© de Oliveira</p>	<p>Gallina ciega: <i>Phyllophaga crinita</i></p>	<p>Los daños son causados por las larvas que se alimentan de las raíces. Después del daño de las raíces durante la germinación, provoca que las plántulas de menos de 15 cm de altura mueran. La pérdida de soporte puede ocurrir dentro de 7 a 10 días después de la emergencia. Las plantas infestadas que no mueren se desarrollan severamente atrofiadas y nunca producen granos. También puede ocurrir poda de las raíces.</p>	<p>Se recomienda sembrar el sorgo en campos donde no se haya cultivado con zacates. Realizar aplicaciones de insecticida en surcos o bandas al momento de la siembra. La aplicación de insecticidas presembrado es efectiva pero cara, porque el insecticida se debe de aplicar a todo lo ancho del terreno y después incorporarlo en el suelo.</p>



2. Insectos que atacan las plántulas

Nombre	Síntomas	Control
 <p>© Texas A&M AgriLife Extension</p>	<p>Gusanos cortadores: muchas spp, Familia <i>Noctuidae</i></p> <p>Algunos cortan las plantas de sorgo ligeramente por debajo de la superficie del suelo (gusanos cortadores de la superficie del suelo). Algunos se alimentan de partes de la planta sobre el suelo (gusanos trepadores o gusano soldado) y otros se alimentan de las partes subterráneas de las plantas, incluidas las raíces de las plántulas (gusanos cortadores subterráneos). Las plantas con daño severo en el tallo mueren. Las hojas dañadas presentan rasgaminetos, mientras que cuando se alimentan de raíces matan a las plantas pequeñas o atrofia las plantas más grandes.</p>	<p>Se recomienda realizar labranza al suelo para destruir la vegetación a finales del verano o principios del otoño. Se pueden utilizar herbicidas para matar las malas hierbas de invierno. Los insecticidas pueden utilizarse, pero la efectividad del control puede variar en gran medida. Aplicaciones durante el atardecer. Los gusanos cortadores subterráneos se pueden eliminar con insecticida aplicado al suelo durante la siembra.</p>

 <p>© Bradshaw</p>	<p>Gusano de la raíz de maíz del sur: <i>Diabrotica undecimpunctat a howardi</i></p>	<p>Se alimenta y perfora raíces del sorgo o entra en el tallo justo por encima de las raíces. Destruye el meristemo apical y evita el crecimiento del tallo principal. Los síntomas de daño son plantas enanas. Se puede presentar madurez retrasada y no uniforme por efectos en la producción de himuelos. Se puede presentar acame al final del ciclo.</p>	<p>El control se puede realizar manteniendo los campos libres de malezas de gramíneas. Roturar y arar 30 días antes de la siembra. Rotación del cultivo con cualquier otro cultivo exceptuando gramíneas forrajeras. Siembras tempanas con una alta densidad de siembra. En el surco, al momento de sembrar, se recomienda la aplicación de insecticida líquido o granulado.</p>
 <p>© Nuessly</p>	<p>Áfido amarillo de la caña de azúcar: <i>Siphia flava</i></p>	<p>Se alimentan en el envés de las hojas inferiores de la planta de sorgo e inyectan toxinas. Los áfidos provocan hojas color púrpura en las plántulas. Las plantas que no mueren son severamente atrofiadas y la madurez se retrasa. Conforme avanza el tiempo los síntomas de decoloración son visibles, lo cual indica que las plantas han sido heridas de manera significativa. Los daños a menudo causan acame de la plantas, que pueden ser acentuado por pudriciones del tallo asociados.</p>	<p>Muchos depredadores se alimentan de los pulgones, pero el áfido rara vez es parasitado. El crecimiento rápido de las plántulas es importante. Existen varios insecticidas foliares que controlan de manera eficaz. Algunos insecticidas sistémicos aplicados a la semilla o en el surco al momento de la siembra también pueden controlarlos.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Áfido de la caña de azúcar: <i>Melanaphis sacchari</i></p>	<p>Estos áfidos prefieren alimentarse por el lado de debajo de las hojas viejas. El daño es progresivos de la parte de abajo a la parte superior de la planta. Los adultos y las ninfas son amarillas. Ellos succionan la savia de las partes inferiores de las hojas lo que resulta en un limitado crecimiento y tornandose de color amarillo. El daño es mas severo en cultivos bajo estrés de agua, lo que resulta en una deshidratación de las hojas y la muerte de las plantas. Se puede presentar moho en las partes donde se secreta miel.</p>	<p>La destrucción de las plantas que sobreviven al invierno se considera como un método eficaz para reducir la población del áfido en campos con sorgo. Se sugiere sembrar temprano, con altas densidades de siembra y cortar el forraje del sorgo antes de la primera semana cuando se observe la presencia del áfido.</p>

 <p>© Bradshaw</p>	<p>Chinche: <i>Blissus leucopterus</i></p>	<p>Los adultos de la chinche y las ninfas dañan las plantas al consumir grandes cantidades de jugos de tallos o partes subterráneas de las plantas. Las plantas jóvenes son altamente susceptibles al daño, mientras que las plantas más viejas soportan más chinches que las plantas más pequeñas, pero estas, también se tiñen de rojo, debilitando la planta y retrasando su crecimiento, con frecuencia se presenta acame. Brotes de chinche se ven favorecidas por el clima seco.</p>	<p>Los insecticidas sistémicos para el control de plagas del suelo aplicados a la semilla o durante la siembra pueden controlar las chinches. El insecticida aplicado por aviones rara vez es eficaz o recomendado.</p>
---	--	--	---

3. Insectos y arañas que atacan las hojas y los verticilos foliares

	Nombre	Síntomas	Control
 <p>© Mendes</p>	<p>Áfido de la hoja del maíz: <i>Rhopalosiphum maidis</i></p>	<p>Se encuentra con mayor frecuencia en lo profundo del cogollo de la hoja media en la etapa de embuche del cultivo, también en la parte inferior de las hojas, en los tallos o en panopjas. Los adultos y las ninfas se alimentan de jugos de la planta, pero no inyectan toxinas. El síntoma más evidente es un moteado amarillo de las hojas. A veces, los mohos crecen en la mielecilla producida. La mielecilla en la panoja puede dificultar la cosecha. El pulgón también transmite el virus del mosaico del enanismo del maíz (MDMV).</p>	<p>Las pérdidas de rendimiento se producen sólo cuando los áfidos de las hojas de maíz provocan la pérdida de soporte de las plántulas. De vez en cuando, los pulgones de las hojas de maíz se vuelven tan abundantes en algunas plantas en un campo que la ejerción de las panojas y el desarrollo de las plantas se ven obstaculizados. Aunque este áfido no necesita ser controlado, esta y otras plagas de áfidos se puede controlar con insecticidas especialmente sistémicos.</p>
 <p>© Araújo</p>	<p>Pulgón Verde: <i>Schizaphis graminum</i></p>	<p>Se considera una plaga clave del cultivo de sorgo. El pulgón chupa los jugos e inyecta toxinas en las plantas. Se alimentan en la parte de abaxial de la hoja y producen mucha mielecilla. Normalmente no alcanzan a causar mucho problema hasta que aparece la panoja del sorgo. Las infestaciones se pueden detectar por la aparición en las hojas con manchas rojizas causadas por la toxina que inyectan. Las hojas dañadas comienzan a morir, se tornan amarillas y marrones de los bordes exteriores. También transmiten el virus del mosaico del enanismo del maíz (MDMV) y pueden predisponer a la pudrición carbonosa.</p>	<p>La lluvia y los depredadores suprimen el aumento en la abundancia del áfido al inicio de la temporada. El parásito <i>Lysiphlebus testaceipes</i>, por lo general es el responsable de la rápida disminución de la abundancia de áfidos al final del ciclo. Se recomienda el uso de híbridos resistentes al pulgón. Puede controlarse con algunos insecticidas pero es resistente a otros. Algunos insecticidas sistémicos aplicados a la semilla o en el surco al momento de la siembra pueden controlar al pulgón.</p>





© ICRISAT

Acaro de la hierba:
Oligonychus pratensis

Los ácaros succionan los jugos de la parte adaxial de las hojas de sorgo. Las áreas infestadas de las hojas son de color amarillo pálido en la superficie superior y más tarde se vuelven de color rojizo. Las hojas pueden morir. Sin embargo, la pérdida de rendimiento puede ser importante si el ataque es lo suficientemente abundante en la etapa de grano masoso como para causar acame y pérdidas asociadas en la cosecha.

Se sugiere no sembrar sorgo al lado de trigo. El uso de insecticida se justifica cuando una tercera parte de las hojas de la mayoría de las plantas de sorgo en un campo están infestadas con ácaros. Se necesita una cobertura completa con una mezcla aspejada. Los insecticidas pueden no proporcionar un control eficaz debido a que los ácaros a menudo son resistentes.


4. Barrenadores del Tallo

	Nombre	Síntomas	Control
 © Mendes	Barrenador de la caña de azúcar: <i>Diatraea saccharalis</i> -Barrenador Neotropical: <i>D. lineolata</i> -Barrenador del maíz del suroeste: <i>D. Grandiosella</i>	Las larvas jóvenes se alimentan durante unos días sobre las hojas o el eje de la hoja. Las larvas de mayor edad barrenan un túnel tanto hacia arriba como hacia abajo sobre la médula del tallo. Tallos infestados con el gusano barrenador son de menor diámetro, y pueden presentar acame. El barrenado de las larvas a menudo hace que el pedúnculo se rompa y panoja caiga. Lesiones por barrenadores hace que la planta sea más susceptible a la pudrición del tallo patógenos	Se recomienda sembrar el sorgo temprano en el ciclo y arar para romper el rastrojo y enterrar los residuos de cultivos poco después de la cosecha, esto destruye las larvas que se encuentran en hibernación al exponerlas a temperaturas frías. El control químico rara vez se justifica.
 © Ward	Gorgojo del Rizoma de la caña de azúcar: <i>Anacrinus deplanatus</i>	Los gorgojos adultos se alimentan de las plantas de sorgo jóvenes y los rizomas. Este daño es notable, pero no tan grave como el causado por las larvas. Las larvas barrenan un túnel en el tallo de sorgo por debajo o justo por encima de la superficie del suelo. Su alimentación y el daño que causan es responsable de una apariencia de estrés por sequía y el acame de plantas de sorgo. Orificios de salida y túneles de alimentación permiten a patógenos tales como la pudrición carbonosa para entrar en la planta.	El gorgojo infesta esporádicamente el cultivo de sorgo, especialmente durante los años de sequía. Buenas prácticas culturales que promueven el desarrollo precoz y vigoroso de la planta son beneficiosos contra este insecto. Insecticidas eficaces y técnicas de aplicación no están disponibles.

5. Insectos que atacan la panícula

	Nombre	Síntomas	Control
 <p>© ICRISAT</p>	<p>mosquita del sorgo: <i>Stenodiplosis sorghicola</i></p>	<p>Las larvas se alimentan del ovario recién fecundado, impidiendo el desarrollo de la semilla y causando la pérdida directa del grano. Las glumas de las espiguillas infestadas estén ajustadas firmemente, porque la semilla ya no se desarrolla. Típicamente, una panícula del sorgo infestada por mosquita del sorgo tendrá, dependiendo del grado de daño, varias proporciones de granos normales dispersas entre espiguillas sin semilla.</p>	<p>La siembra de híbridos de madurez uniforme y precoz es el método más eficiente para el control. Previene la floración tardía y evita las infestaciones dañinas. El arado profundo en campos cosechados con sorgo mata algunas larvas en hibernación. Aplicaciones múltiples de insecticidas para evitar daños se debe de utilizar cuando el sorgo se siembra demasiado tarde.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Gusano Elotero: <i>Helicoverpa zea</i></p>	<p>El gusano elotero y la oruga de la panoja se alimentan de los granos en desarrollo. Destruyen los granos principalmente de la parte de adentro de la panoja. Algunas especies fabrican telarañas de seda en la parte interior de la panoja o hacen pequeños hoyos en el grano. En cultivares con panoja compacta, la parte interior puede estar completamente dañada, al mismo tiempo que se ve normal y sana en la parte exterior. Cuando se alimentan de los granos en desarrollo, es cuando se presenta el daño más severo y la consecuente pérdida de rendimiento. Estos gusanos causan severos daños bajo condiciones de alta humedad.</p>	<p>Se pueden controlar usando trampas con feromonas sintéticas de atracción sexual. Eliminar los residuos de cosecha del ciclo anterior. Liberar enemigos naturales como el hongo <i>Trichogramma pretiosum</i>. Utilice pesticidas selectivos y use agentes microbiológicos como el baculovirus y <i>Bacillus thuringiensis</i>.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Oruga de la panoja Eublemma silicula</p>		
 <p>© Mendes</p>	<p>Gusano soldado de otoño o Gusano Cogollero: <i>Spodoptera frugiperda</i></p>	<p>Los gusanos cogolleros también infestan tanto el cogollo y la panoja del sorgo. Se alimentan de los cogollos hasta que las panojas comienzan a emerger. Pequeñas larvas jóvenes se alimentan primero en las espiguillas. A medida que crecen las larvas, se alimentan de los granos en desarrollo. La mayoría del daño a granos es causado por las larvas más grandes y aproximadamente 80% de daño es por los dos últimos estadios larvales.</p>	<p>Se recomienda el uso de avispas y moscas que parasitan; diversos insectos y escarabajos depredan, y agentes patógenos, especialmente hongos infectan y matan las larvas del gusano cogollero. La siembra temprana es una importante táctica de manejo para escapar de la infestación. El uso de híbridos de sorgo con panojas abiertas y laxas es una práctica de manejo eficaz.</p>

5. Insectos que atacan la panícula

	Nombre	Síntomas	Control
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Insectos que se alimentan de la panoja: <i>Oebalus pugnax</i> <i>Nezara viridula</i> <i>Chlorochroa ligata</i> <i>Leptoglossus phyllopus</i> <i>Nysius raphanus</i> <i>Calocoris angustatus</i></p>	<p>Estos naturalezas y síntomas de daños similares. Chupan los jugos de los granos de sorgo en desarrollo. Pueden causar daño económico, en función del número de insectos por panoja, la duración de la infestación y la etapa de desarrollo del grano cuando se produzca la infestación. Granos de sorgo en la etapa de masoso duro por lo general no son dañados. Tanto las ninfas como los adultos reducen el peso, el tamaño y la calidad del grano. Los hongos con frecuencia infectan y producen granos dañados que ennegrecen y se deterioran.</p>	<p>Para la mayoría de las especies, se requiere una infestación de dieciséis o más insectos por panoja en la etapa de masoso duro de desarrollo del grano para justificar la utilización de chinches verdes apestosas del sureste, conchuelas, o chinches foliadas por panoja en las etapas de desarrollo del grano de lechoso y masoso suave, respectivamente.</p>

Nematodos

Nematodos parásitos de las plantas han demostrado que causan pérdidas de rendimiento en el sorgo (Claflin 1983). *Meloidogyne*, *Tylenchorhynchus*, *Belonolaimus*, *Pratylenchus*, *Xiphinema* y *Trichodorus* son géneros importantes en la evaluación del posible daño causado por nematodos en el sorgo. Investigación en Nematología utilizando sorgo como cultivo hospedero es muy escasa. Las interrelaciones potenciales de hongos, bacterias y nematodos, y como se relacionan con el complejo de la pudrición del tallo en el sorgo no se han investigado en profundidad. El Cuadro 4 enumera los géneros de nematodos que son cosmopolitas y tienen más probabilidades de estar implicados en las pérdidas de rendimiento de sorgo.

Cosecha y Logística

La cosecha y la logística de sorgo energético difieren de acuerdo con el uso final del producto. Hay tres métodos principales de recolección: Si el sorgo dulce se cultiva sólo para la producción de bioetanol de primera generación (por ejemplo, Brasil), si se cultiva tanto para bioetanol de primera generación y la producción de granos (por ejemplo, la India) y si se cultiva para la producción de bioetanol de segunda generación o biogás (por ejemplo, Europa).

Cuadro 4: Géneros de nematodos fitoparásitos que pueden ser patógenos en sorgo (Clafin 1983).

Nematodo	Modo en que parasita	Síntomas característicos	Hospederos alternativos al sorgo
Lesion en la raíz (<i>Pratylenchus spp</i>)	Endoparasito	Disminución en el vigor de la planta, lesiones necróticas de las raíces, la asociación con microorganismos que causan complejos de enfermedades, disminuye el peso de los granos.	Pastos, cereales, remolacha, repollo, tomate, Tabaco, legumbres; arriba de 400 hospederos.
Nódulo en la raíz (<i>Meloidogyne spp</i>)	Endoparasito	Disminución en vigor de la planta, enanismo, retraso en el crecimiento, formación de nódulos en la raíz, proliferación de ramificación en las raíces, reducción de sostén, retraso en la floración.	Pastos, cereales leguminosas, algodón, tabaco, tomate y papa.
Nematodo Atrofiado (<i>Tylenchorhynchus spp</i>)	Ectoparasito	Retraso en el crecimiento, desarrollo raquítrico de las raíces, disminución del vigor de las plántulas, las puntas de las raíces pueden ser cortos y engrosadas.	Pastos, cereales, leguminosas.
Nematodo de Aguijón (<i>Belonolaimus spp</i>)	Ectoparasito	Disminución del vigor de la planta, retraso en el crecimiento, desarrollo limitado de los sistemas radicales, el nivel de tolerancia en el maíz es 1 nematodo/100 cm ³ de suelo, por lo general sólo se detectan en suelos arenosos.	Algodón, cereales, leguminosas, vegetales y tabaco.
Nematodo Daga (<i>Xiphenema spp</i>)	Ectoparasito	Disminución del vigor, pobre desarrollo de las raíces, una extensa necrosis del tejido de la raíz.	Cítricos, árboles frutales y de sombra, cereales, pastos, leguminosas y vegetales.

Cosecha de los Tallos (Bioetanol de 1ª Generación):

El momento ideal para la cosecha y el período de utilización industrial se determinan por los valores de Brix, azúcares totales y reductores y el porcentaje de ambos, la curva de maduración de cada variedad, la longitud de tiempo a partir del décimo día después de la floración hasta la etapa de madurez del grano, y en el caso de variedades, de 30 a 60 días después de la floración. Según Schaffert *et al.* (1980), el proceso de acumulación de azúcares en el sorgo dulce incrementa después de alcanzar la etapa de floración y continúa hasta la etapa de madurez fisiológica de los granos.

En Brasil se han desarrollado nuevos híbridos, que pueden cosecharse después de 100 a 120 días. Con el fin de determinar el mejor momento para la cosecha, la cantidad de azúcar en el jugo se debe medir con un hidrómetro Brix o un refractómetro de azúcar durante los períodos mencionados anteriormente. La cosecha debe comenzar cuando el contenido total de azúcar en el jugo es de 12,5% (Mantovani *et al.* 2012) o cuando se alcanza una lectura aproximada de 15,5 ° a 16,5 ° Brix (Bitzer y Fox 2000).

Actualmente, no existen cosechadoras hechas especialmente para el sorgo dulce. Para las plantaciones a gran escala, la cosecha de sorgo dulce se hace mediante el uso de las mismas cosechadoras de otros cultivos como la caña de azúcar (Figura 9). Algunos equipos están siendo diseñados, desarrollados y probados en Brasil. Una cosechadora equipada con una herramienta que permite la recolección de las panojas cortadas en lugar de quedarse en el campo sería ideal. La siembra se lleva a cabo de acuerdo a la separación necesaria para estas máquinas y doble espacio de 0.60 m / 0.90 m ha sido el más común. Con el aumento de la demanda del sector industrial para el procesamiento del producto de la cosecha (cortes de tallo de 20 cm) para la producción de alcohol, se están haciendo ajustes en los cilindros de corte y cortes futuros podrían realizarse teniendo en cuenta las exigencias de las plantas. La recomendación para cortar los tallos por el equipo de recolección es de 20 cm, teniendo en cuenta que los campos de producción no se encuentran muy lejos de las molineras (Mantovani *et al.* 2012).

El sorgo dulce es similar a la caña de azúcar en el que el zumo (azúcar) en el tallo debe procesarse con bastante rapidez, de otro modo los azúcares en el tallo se pierden y la calidad del zumo se deteriora. Reddy *et al.* (2008) mostró datos sobre cómo la cantidad de azúcar disminuye en el transcurso de cuatro días (Cuadro 5). Teniendo en cuenta que el azúcar de sorgo dulce, al igual que en la caña de azúcar, necesita ser procesado con rapidez, las tecnologías deben desarrollarse para estabilizar el jugo y mantener el azúcar para su posterior procesamiento de modo que la temporada de procesamiento para el azúcar podría extenderse (Turhollow *et al.* 2010). Además, si los tallos no se procesan inmediatamente, tendrán que ser descargados, almacenados y cargados de nuevo, lo que aumenta los costos.

Cosecha de granos y tallos (Alimento y Bioetanol de 1ª Generación):

El grano de cultivos de sorgo se cosecha generalmente de una manera similar como otros granos pequeños, tales como el trigo. En la agricultura moderna, los sorgos de grano han sido desarrollados para tener una altura uniforme, de modo que se pueden cosechar de manera eficiente con una cosechadora. Variedades de sorgo dulce desarrollados para grano y tallo son mucho más altos que las variedades de sorgo de grano tradicionales. Por lo tanto, las máquinas convencionales no pueden utilizarse para la cosecha. En la India, por el momento la cosecha se realiza manualmente. En una primera etapa toda la planta se corta y en una segunda etapa se eliminan y se recogen las panículas (Figura 9). Nuevos métodos de cosecha tanto para grano y tallo se están probando en Australia (Agrifuels 2009).

El momento de la cosecha es muy importante para el sorgo dulce de doble propósito y varía de acuerdo a la variedad. La fecha más propicia para la cosecha debe ser determinada de acuerdo con el rendimiento de tallo fresco, la tasa de jugo, el grado de azúcar y la producción de grano (FAO 1994).

Cuadro 5. Comportamiento de la disminución del contenido de azúcar en relación al retraso de la molienda (Reddy et al. 2008).

Molienda (días después de la cosecha)	Extracción de jugo (L x 103 / ha)	°Brix	Rendimiento de Azúcar (Mg/ha)	Reducción del azúcar a partir de la cosecha (%)
0	42.4	18.5	2.62	-
1	40.6	19.2	2.47	5.7
2	35.0	20.9	2.18	16.8
3	37.6	21.4	2.20	16.0

Cosecha de toda la planta (Generación de bioetanol de 2ª generación y biogás):

Los sorgos altos se cosechan con una cosechadora de forraje (Figura 12). Altos tonelajes requieren grandes cosechadoras autopropulsadas, que tienen elevados costos de inversión. Sin embargo, las condiciones del campo y la carretera no pueden permitir, ya sea física o económicamente, el uso de equipos de cosecha a gran escala y que puede tener sentido usar una cosechadora de forraje arrastrado por tractor. *Pari et al* (2008) informaron sobre los esfuerzos europeos para desarrollar una cosechadora de sorgo a escala apropiada a las condiciones europeas.



Figura 10. Cosechadora ajustada para la cosecha de sorgo dulce (© Embrapa).

El momento de la cosecha depende de cuándo se necesita la biomasa, el tipo de variedad, duración de la temporada, la época de la siembra y los parámetros de humedad deseados. En las zonas templadas, la cosecha por lo general se produce entre septiembre y octubre para la producción de biogás.

Otra opción en las zonas templadas podría ser sembrar sorgo tras un cultivo de invierno. Después de recoger la cosecha de invierno en junio, el sorgo se puede sembrar. No va a tener tiempo suficiente para completar todo el ciclo, sino que puede ser cosechado en noviembre dando un buen rendimiento de la biomasa para el bioetanol de 2ª generación, y en un momento en que no coincide a la cosecha de otros cultivos de biomasa.



Figure 11 : Récolte manuelle du sorgho sucré double usage en Inde (© ICRISAT)



Figura 12. Sorgo energético cosechado como materia prima bioenergética celulósica (Fuente: © Jordan).

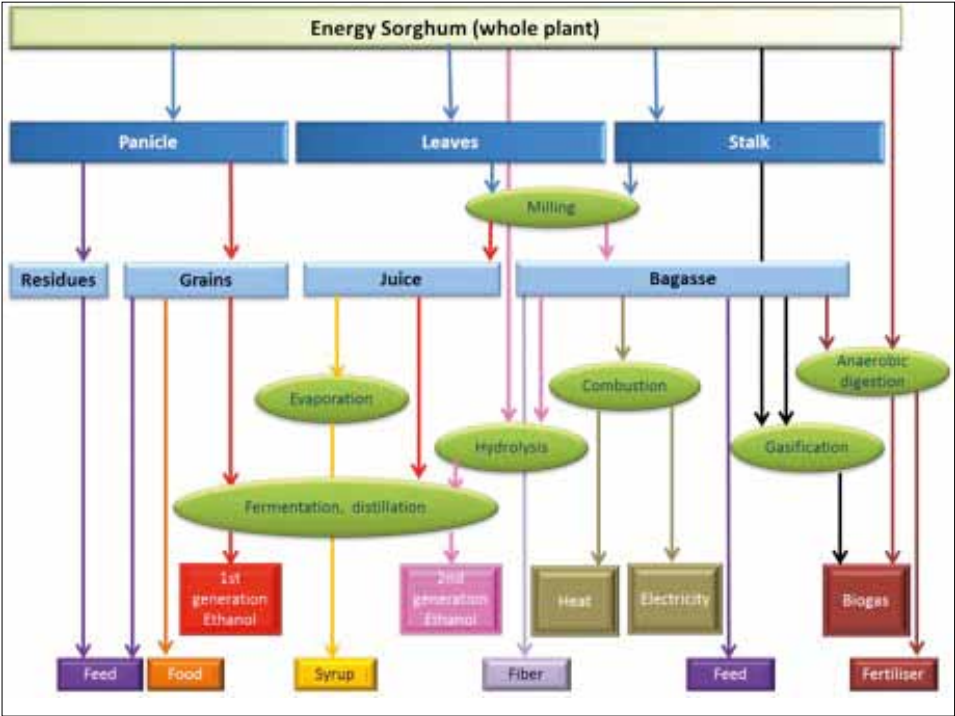
Los dos métodos más comunes para la cosecha sorgos para la biomasa son el corte en hileras seguido por el empaclado o cortado en melgas, y cortar forraje directo del cultivo en pie. Una consideración clave en la elección entre los dos métodos es el contenido óptimo de humedad final de la biomasa para el uso final deseado, así como el nivel de secado posterior que se necesita para lograrlo. Podría decirse que el método más conveniente para la cosecha de biomasa de sorgo es picar el material en pie en un camión a su paso por el

campo. Este método minimiza la suciedad en el producto de la cosecha. Sin embargo, también requiere un procesamiento rápido de la biomasa cosechada porque los azúcares presentes en el material recién picado contribuirán a su degradación. Usando una hileradora de cortar y rastrillar para su recogida posterior es otra manera de cosechar y secar el sorgo para biomasa. Este método permite que la biomasa sea secada en el campo antes de la recolección final, cuando se requiere el material seco o se prefiere de almacenamiento de campo (Blade Energy Crops 2010). Para la producción de biogás, el material picado se puede almacenar como ensilaje y procesar más tarde. Por lo tanto, se evita la degradación.

Aplicaciones del Sorgo Energético

El cultivo de sorgo se puede separar en tres partes principales (panoja, hojas y tallo), cada una se utiliza para la producción de una variedad de productos tales como piensos, alimento, jarabe de azúcar, fibra, composta y biocombustibles. El sorgo energético puede ser convertido en vectores energéticos a través de cualquiera de las dos vías: bioquímica y termoquímica. A través de procesos bioquímicos los azúcares de los cultivos pueden convertirse en biocombustibles (primera y segunda generación de etanol, biogás). Los procesos termoquímicos tales como la combustión, pirólisis y la gasificación se pueden utilizar para la conversión del bagazo de sorgo en energía térmica y eléctrica. La Figura 13 muestra las diferentes opciones de uso potencial de las partes del sorgo energético y los procesos que siguen para la producción de los productos mencionados anteriormente.

Figura 13: Procesos a los cuales se puede someter el sorgo energético y sus productos



Producción de Jarabe

La producción de jarabe de sorgo dulce ofrece a los agricultores una excelente oportunidad para mejorar los ingresos agrícolas y la productividad. Es ideal para el pequeño propietario con un capital limitado. El jarabe del sorgo dulce puede ser un producto comercial atractivo. Un excelente jarabe se puede elaborar cuando los °brix del jugo crudo es mayor a 15%. En unidades de producción pequeña, no se añaden productos químicos en la fabricación del jarabe. Esto está en marcado contraste en la industria cañera en la fabricación de jarabe/azúcar morena donde se añaden normalmente diversos productos químicos, principalmente para mejorar el color del producto.

El rendimiento y la calidad del jarabe del sorgo dulce se ven influenciadas por el equipo y el proceso que se utiliza en la fabricación y por el conocimiento y la habilidad del fabricante de jarabe. Algunas de las razones principales para obtener jarabe de mala calidad son la presencia de sedimentos, así como partículas flotantes en el jarabe o apariencia turbia en general debido a la eliminación inadecuada de desechos, la gelificación del jarabe debido a la alta cantidad de almidón en el jugo, la cristalización debido a la alta

concentración de sacarosa en el jugo y muy baja o alta viscosidad del jarabe producido debido al registro erróneo de °Brix y/o la temperatura del jarabe (Nimbkar *et al.* 2006).

En la India, en unidades de producción pequeñas, después de cosechar los tallos se almacenan en la sombra durante uno o dos días antes de la molienda para la extracción de jugo. Este acondicionamiento permite la inversión de la sacarosa a azúcares reductores y por lo tanto mejora la calidad del jugo. El acondicionado de los tallos antes de la molienda también elimina el exceso de humedad de los tallos y aumenta los °Brix del jugo, que en última instancia ayuda a reducir el tiempo y el combustible requerido para la concentración del jarabe. Una trituradora se usa para presionar el tallo en el proceso para la extracción del jugo.

En lugares donde la recolección es totalmente mecanizada, los tallos se cortan en pedazos durante la cosecha. En este caso los cortes del tallo se llevan inmediatamente para la extracción de jugo ya que la calidad del jugo se deteriorará si se mantiene durante un largo tiempo antes de la transformación.

El jugo de sorgo dulce tiene baja pureza. Además de azúcares, contiene sólidos solubles como antocianinas y la clorofila y sólidos insolubles, tales como gránulos de almidón. El jugo extraído se debe filtrar para retirar grandes trozos de material triturado y debe colarse por un tamiz de malla fina para el tanque de sedimentación con el fin de conseguir un jugo limpio. El jugo colado debe mantenerse en reposo durante 1-2 horas para la sedimentación de los gránulos de almidón.

El jugo sobrenadante (dejar al menos 3-4 cm de jugo de la parte inferior del tanque no alterados) se bombea entonces en un molde donde la evaporación se lleva a cabo. Este es el aspecto más crítico al elaborar el jarabe de alta calidad. Un buen jarabe de calidad se hace después de llevar a cabo la evaporación del desnatado de materiales coagulados que han subido a la superficie. Se requiere un calentamiento lento cuando se empieza a formar espuma, de otra manera el jarabe se quemará. Cuando la temperatura alcanza de 105-107 °C con un grado Brix del 74 a 76%, el calentamiento debe interrumpirse completamente. Si el enfriamiento rápido no se lleva a cabo, el producto tendrá un sabor a quemado y el color del jarabe se convertirá en marrón oscuro. Por lo que el jarabe debe enfriarse a 80 °C dentro de 10-15 minutos previos al llenado en botellas esterilizadas (Nimbkar *et al.* 2006).

Producción de Bioetanol de 1ª Generación

Hoy en día, el 40% del consumo total de energía en todo el mundo se encuentra en forma de combustibles líquidos como la gasolina y el diésel (Tan *et al.* 2008). De hecho, el sector del transporte es casi totalmente dependiente de este tipo de combustible. Por lo tanto, se ha prestado especial atención al posible uso de los biocombustibles en los vehículos. Entre los biocombustibles, el etanol es uno de los más atractivos desde el punto de vista ambiental. Puede mezclarse con gasolina (la fracción de volumen de etanol es por lo general E10% y E85%) para funcionar en vehículos de combustible flexible (FFV, Flex Fuel Vehicules) (Figura 14) e inclusive en concentraciones del 100% en vehículos especialmente transformados (Hahn-Hägerdal *et al.* 2006).



Figura 14: FFVs en una feria comercial (Fuente: Rutz)

El bioetanol se obtiene de la fermentación alcohólica de los azúcares simples o almidón (bioetanol de primera generación) o polisacáridos (bioetanol de segunda generación) en condiciones anaeróbicas. En la presencia de agua y levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*), la glucosa se convierte en etanol, CO_2 , así como cantidades mucho más pequeñas de productos finales menores, tales como glicerol, aceite con mezcla de alcohol (Aceite de Fusel), aldehídos y cetonas (Almodares y Hadi 2009).

Los tallos del sorgo dulce contienen hasta el 75% de jugo, variando entre 12 y 23% en azúcar. El etanol derivado del jugo del sorgo es más barato de producir que el etanol de maíz, ya que no requiere la cocción y enzimas que el grano de maíz requiere para la conversión del almidón en azúcar para obtener el grado de alcohol. Las plantas con tallo más largo y grueso, producen más jugo. El jugo del sorgo dulce no requiere la fermentación y la cocción prolongada, necesaria para procesar el etanol del grano de maíz (Dweikat 2012). Además, el sorgo dulce tiene una alta cantidad de sacarosa y azúcares reductores que se convierten fácilmente en etanol. Pero además, el costo para cultivar sorgo dulce puede ser hasta tres veces menor que el de la caña de azúcar (Reddy *et al.* 2005).



Figura 15. Primera molienda en el proceso de extracción del jugo del sorgo dulce (© Braconnier).

La extracción de jugo para la producción de etanol es el mismo que para la producción de jarabe. La Figura 15 muestra la primera molienda en el proceso de extracción del jugo y la Figura 16 muestra el bagazo que resulta después de la extracción del jugo.

El proceso de fermentación se puede operar ya sea en un sistema de fermentación fed-batch (75% de las destilerías) (Figura 17) o en un sistema continuo, ambos utilizan el reciclaje de células de levadura. En el proceso continuo, el rendimiento de fermentación es más alto que el proceso por lotes y el volumen total necesario es menor que la otra opción, pero el principal problema con este sistema es el riesgo de contaminación con bacterias (Sweethanol 2011a). En ambos procesos, después de finalizar la fermentación, las células de levadura se recogen por centrifugación y vuelven a utilizarse en el siguiente ciclo de



Figura 16: Bagazo resultante después de la extracción del jugo (© Braconnier)



Figura 17: Fermentadores de una planta productora de etanol utilizando caña de azúcar, Brasil (Fuente: Rutz)

fermentación. Hasta el 90-95% de las células de levadura se reciclan, lo que resulta en altas densidades de células en el interior del fermentador (10 a 14% en base de peso húmedo/ v). Se estima que la biomasa de levadura aumenta de 5 a 10% (en relación a la biomasa inicial) durante un ciclo de fermentación, lo que es suficiente para reemplazar las células de levadura que se pierden durante la etapa de centrifugación. Normalmente, la temperatura se mantiene alrededor de 32 a 35 ° C. Cuando la fermentación cesa, células de levadura se separan por centrifugación, lo que resulta en una

suspensión de células de levadura concentrada (la levadura “crema”) con 60 a 70% (base de peso húmedo/v) de las células. La crema de levadura se diluye con agua (en proporción 1:1), y se trata con ácido sulfúrico (pH 1.8-2.5) durante 2 horas, con el fin de reducir la contaminación bacteriana y para ser re-utilizado como motor de arranque para un siguiente ciclo de fermentación. Después de centrifugar, la “cerveza” o “vino” se conduce a la destilación para la recuperación de etanol, normalmente utilizando la tecnología de destilación en platos. Después de destilar una corriente de líquido llamado vinaza se produce en una proporción de 10 a 15 litros por litro de etanol producido. La vinaza puede usarse como remplazo de la harina de soya en la alimentación o como agua de riego y fertilizante en campos sembrado con caña de azúcar (añadiendo al suelo potasio, calcio, magnesio, otros micronutrientes y algo de materia orgánica) (Basso *et al.* 2011).

El bioetanol de primera generación se puede producir no sólo de la fermentación de jugo extraído del tallo, sino también a partir del almidón en los granos (Figura 18). El procesamiento de la producción de etanol a partir de sorgo dulce es similar al de maíz y fue



Figure 18: Planta ABENGOA de producción de etanol a partir de granos en Salamanca, España (Fuente: © Rutz).



Figura 19: DDGS de una planta productora de etanol a partir de granos (Fuente: © Rutz)

descrito por Quintero *et al.* (2008). Después del lavado, trituración y molienda de los granos de sorgo dulce, el material con almidón se gelatiniza, licua y sacarifica utilizando enzimas como α -amilasa y glucoamilasa para producir glucosa. La fermentación, destilación y deshidratación del procesamiento del grano de sorgo son similares a los de los azúcares del tallo del sorgo dulce. Sin embargo, los subproductos de grano no son similares al tallo y se les denomina DDGS (granos secos de destilería con solubles, por sus siglas en inglés) (Figura 19). Los DDGS es un co-producto sólido del proceso de producción de etanol a partir de cereales y es un alimento de alto valor nutrimental que se utiliza por la industria ganadera (Almodares y Hadi 2009).

Producción de Bioetanol de 2ª Generación (Materiales Ligno-celulósicos)

El bioetanol de segunda generación es el etanol producido a partir de biomasa ligno-celulósica, como los cultivos leñosos, residuos agrícolas o desechos (por ejemplo, el bagazo de sorgo), que a diferencia del bioetanol de primera generación no causan conflictos entre los alimentos / piensos y usos industriales. Por el momento, la desventaja del bioetanol de segunda generación es que es más difícil y más caro de extraer. La eficacia de la fermentación de materias lignocelulósicas presenta dos retos principales. En primer lugar, la estructura cristalina de la celulosa, que es altamente resistente a la hidrólisis y en segundo lugar, la asociación de lignina-celulosa, que forma una barrera física que impide el acceso enzimático a las fibras de celulosa. Además, la hidrólisis ácida de celulosa requiere el uso de altas temperaturas y presiones, que conduce a la destrucción en partes de los carbohidratos, que se convierten principalmente a los compuestos furánicos. Pero además, se tiene la generación de sustancias tóxicas por la degradación parcial de la lignina (Jacobsen y Wyman 2000).

Para hacer posible el uso de materiales lignocelulósicos como materias primas para la producción de etanol y otros productos químicos, es necesario separar sus componentes principales (lignina, hemicelulosa y celulosa). Para esta separación, una etapa de tratamiento previo es esencial, cuyo objetivo es desorganizar la matriz lignocelulósica. El pretratamiento se puede realizar a través de procesos físicos, físico-químicos, químicos o biológicos y puede ser asociada o seguido por procedimientos de hidrólisis de los polisacáridos (hemicelulosa y celulosa) en sus respectivas unidades monoméricas, las pentosas y hexosas (Betancur y Pereira 2010a, b).

El uso de variedades con nervadura central café en el sorgo tiene la ventaja de producir biomasa con menor contenido de lignina, mejorando así el proceso de degradación. Después de la hidrólisis, los azúcares están sujetos a la fermentación de la misma manera que en el bioetanol de primera generación.

El uso de la biomasa de sorgo para la producción de etanol de 2ª generación todavía no se aplica a escala comercial en la actualidad. Una buena visión general sobre instalaciones para la producción de biocombustibles de segunda generación se puede revisar por ejemplo en IEA Task 39 (2013) y Janssen *et al.* (2013).

Producción de biogás mediante la digestión anaeróbica

La producción y utilización del biogás producto de la digestión anaeróbica (AD) presenta beneficios ambientales y socio-economicos para la sociedad en general pero también para los agricultores involucrados. La utilización del valor interno en la cadena de la producción de biogás estimula las capacidades economicas locales, protege el trabajo en áreas rurales e incrementa el poder adquisitivo regional. Mejora los estandares de vida y contribuye al desarrollo económico y social (Al Seadi *et al.* 2008).

El proceso AD esta definido como un proceso biológico en el cual la materia orgánica se metaboliza por una serie de microorganismos en un ambiente libre de oxígeno disuelto o de sus precursores (por ejemplo H_2O_2) y bioxido de carbóno (CO_2). El biogás contiene también otros gases como el H_2 , H_2S y NH_3 . El proceso anaeróbico es complejo porque involucra un grupo diverso de microorganismos y una serie de etapas metabólicas interdependientes.

La Figura 20 muestra los diagramas esquemáticos de las diversas etapas implicadas en el proceso de digestión anaerobia. El proceso general, ocurre en 4 pasos. Compuestos orgánicos complejos, tales como proteínas, hidratos de carbono y lípidos se transforman en productos solubles simples, tales como aminoácidos, azúcares, y ácidos grasos de cadena larga, ácidos y glicerina por la acción de enzimas extracelulares excretados por un grupo de bacterias llamadas las bacterias fermentativas (FB). Este primer paso se conoce comúnmente como la hidrólisis.

En el segundo paso o acidogénesis las mismas bacterias fermentativas actúan sobre los productos solubles de la primera etapa a una mezcla de ácidos orgánicos, de hidrógeno y dióxido de carbono. La acidogénesis es la generación de ácidos grasos volátiles (AGV), tales como el ácido propiónico y butírico. Estos AGV junto con el etanol se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono por otro grupo de bacterias conocidas como bacterias acetogénicas que producen hidrógeno (2). La etapa de producción de ácido acético se conoce como acetogénesis.

El ácido acético, H_2 y el CO_2 son los sustratos principales para la última etapa de este proceso conocido como la metanogénesis. Dos grupos de microorganismos llamados *archaea* están involucradas en la metanogénesis. El primer grupo, que utiliza el acetato para la generación de metano se conoce como metanógenos acetotróficos o acetilclástica (AM) y el otro grupo de generación de metano a partir de H_2 y CO_2 se conocen como los metanógenos hidrogenotróficos (HM) (Khanal 2008). En función de la demanda química de oxígeno, cerca del 72% de la producción de metano proviene de la descarboxilación de acetato, mientras que el resto proviene de la reducción de CO_2 (McCarthy 1964).

La cantidad de gas que se produce depende del tipo de materia prima que se utilice. Se ha reportado que el sorgo es una materia prima adecuada para plantas productoras de biogás (Figura 21) produciendo principalmente metano (Poletti *et al.* 1996; Röhrich 2007). El sustrato utilizado puede ser el ensilaje de toda la planta, el bagazo o el tallo.

Igual que con el maíz, el sorgo puede ensilarse sin problemas. Por ejemplo, el sorgo dulce se utiliza como materia prima para biogás. Se está investigando como una alternativa o cultivo complementario al maíz. Una siembra intensiva de maíz puede tener un efecto ne-

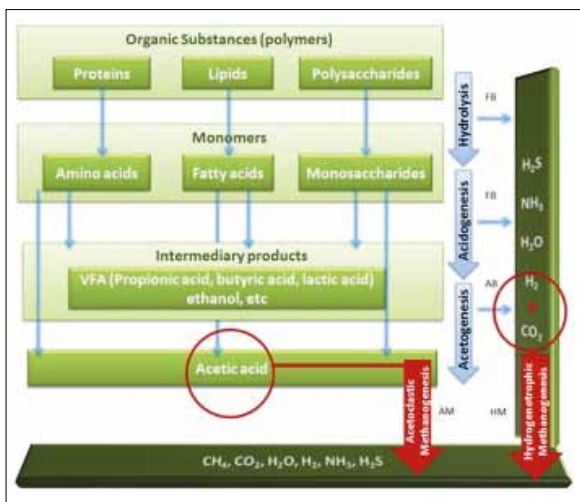


Figure 20: Pasos de la conversión en la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja.

cuando el contenido de la materia seca se encuentra entre 28 % y 32 %. Materia seca por debajo de 25 % y arriba de 35 % causa problemas en la densificación del sustrato.

El rendimiento de metano (CH_4) producido a partir de ensilaje de sorgo se asume en $80 \text{ m}^3/\text{t}$ de materia prima fresca en comparación a la producción del metano del ensilaje del maíz (toda la planta) la cual fue $106 \text{ m}^3/\text{t}$ (BMU 2012, Rutz *et al.* 2012), sabiendo que el rendimiento del metano depende de la variedad utilizada. Para la producción de biogás, la biomasa de sorgo dulce es quebrada durante la cosecha y después se almacena como ensilaje hasta su uso. El ensilaje se introduce en el biodigestor y durante la digestión anaerobia (DA) produce biogás el cual se utiliza para la cogeneración de calor y producción electricidad (CHP). Alternativamente, el biogás se puede refinar más a bio-metano e inyectado como sustituto del gas natural en la red de gas o utilizar directamente

como combustible para el transporte en sustitución de la gasolina convencional y el gas natural. En todos los procesos de AD, se produce digestato como sub-producto y se utiliza como abono sustituyendo fertilizantes minerales. Los tamaños típicos de instalaciones de biogás en Europa tienen una capacidad de aproximadamente 450 kWel. En instalaciones de biogás agrícola, el agricultor es a menudo el proveedor de la materia prima, así como el operador y propietario de la planta (Rutz *et al.* 2013).

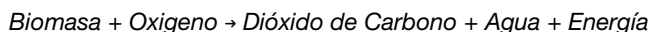


Figura 21: Planta Agrícola de Producción de Biogás, Alemania (Fuente: © Rutz)

Aparte de metano, puede producirse altas cantidades de hidrógeno a través de la digestión anaerobia. El hidrógeno tiene el mayor contenido de energía por unidad de peso de cualquier combustible conocido (142 kJg), y produce sólo agua cuando se quema como combustible o es convertido en electricidad. Por lo tanto, el hidrógeno es considerado como una alternativa de energía ideal debido a su limpieza, el reciclaje y la eficiencia (Das, 2009; Gosselink 2002). Entre los diversos sustratos posibles, los carbohidratos son la principal fuente de hidrógeno durante los procesos de fermentación y por lo tanto la biomasa natural rica en carbohidratos, tales como los cultivos energéticos renovables como el sorgo, que pueden ser considerados como un sustrato muy prometedor para la producción de biohidrógeno (Hallenbeck 2009 ; Kapdan y Kargi 2006; Antonopoulou *et al.* 2008). Shi *et al.* (2010) reportaron un rendimiento de hidrógeno acumulado de 127.26 ml / g de tallo pretratado en una solución 0,4 % de NaOH.

Combustión de la Biomasa del Sorgo Dulce

La combustión de la biomasa sólida implica una serie de diferentes procesos químicos y físicos complejos. Simplemente representado, la biomasa se quema con un suministro de oxígeno y es transformada en dióxido de carbono y agua:



El proceso completo de combustión experimenta varias fases y puede, por lo tanto, dividir el proceso de combustión en diferentes etapas (Cuadro 6).

La combustión de biomasa comienza con la fase de calentamiento. En la fase de secado posterior, que tiene lugar a aproximadamente 100 ° C, el agua adherida o contenida en la madera se evapora. De este modo, como es el caso en las otras etapas de combustión, el proceso avanza desde el exterior hacia el interior. Como en el interior las partículas de combustible todavía se está secando, la descomposición pirolítica de los componentes de la madera ya comienzan en el exterior. El término pirólisis se entiende como los procesos químicos, en el que el calor se alimenta por la exclusión de oxígeno. Esto da lugar a una ruptura de los enlaces orgánicos de cadena larga en cadenas más corta. Los gases combustibles en forma de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos gaseosos, así como aceite de pirólisis (alquitrán) se acumulan. Este proceso no requiere oxígeno. Como el oxígeno está presente en una forma almacenada químicamente (para madera alrededor del 44% de la masa seca) o por medio del suministro de aire, las reacciones de oxidación completa se producen más o menos cuando se libera calor, inmediatamente después del proceso de descomposición.

Con el fin controlar el proceso de desgasificación en sistemas de combustión, el oxígeno atmosférico, o llamado aire primario, se introduce en el sistema de combustión y dirigido a donde se lleva la descomposición pirolítica (por ejemplo, el quemador). Este subproceso se describe como desgasificación. El calor requerido por las reacciones incompletas de los productos de la pirólisis es proporcionado por el oxígeno. Para la reacción de sólidos y líquidos (carbón, alquitrán), en comparación con la descomposición pirolítica, son necesarias temperaturas notablemente más altas, por encima de 500 °C. Con el sub proceso de oxidación, los combustibles gaseosos se han extendido ya parcialmente en la cámara

Cuadro 6: Esquematzación del proceso de combustión

Fase	Temperatura	Cadena de Producción
El calentamiento del combustible a través de la reflexión de la flama, cama de combustión y las paredes del horno.	< 100°C	Madera secada con aire
El secado del combustible a través de la evaporación y el drenaje del agua.	> 100°C	Tallo de la madera secado con aire
Descomposición pirolítica del combustible libre de agua	> 150°C	Combustible gaseoso, madera absolutamente seca
Gasificación del combustible con oxígeno a combustibles gaseosos (CO, hidrocarburos) y carbón sólido.	> 250°C	Combustible gaseoso, Carbón de Madera
Gasificación del carbón sólido con dióxido de carbono, vapor de agua y oxígeno a monóxido de carbono.	> 500°C	Combustible gaseoso, Carbón de Madera
Oxidación de los combustibles gaseosos con el oxígeno a dióxido de carbono y agua	700°C – 1400°C	Gases de escape, Cenizas
Emisión de calor de la cama de combustión en las paredes circundantes, intercambiador de calor y el combustible suministrado recientemente	< 1400°C	Gases de escape, Cenizas

de combustión. A través del suministro específico de oxígeno atmosférico (aire secundario) en esta fase una oxidación más o menos completa de los productos gaseosos liberados puede tener lugar. Esto resulta en la generación de dióxido de carbono (CO_2) y agua. La degradación de los hidrocarburos tiene lugar a través de la construcción de CO como producto intermedio que reacciona con el CO_2 en una oxidación progresiva. En esta fase la radiación de luz y calor que se emite y las llamas son visibles. Además de los la oxidación, que está indicada por la formación de llamas, es igualmente significativo para los combustibles biogénicos sólidos la combustión sin llama que tiene lugar en la etapa final del proceso de combustión. El producto final de la descomposición pirolítica se construye de carbón sólido (carbón vegetal) en el lecho de combustión, el cual se gasifica primero (gasificación de carbón) y luego en la fase de gas posterior es oxidado. La ceniza se queda atrás como un residuo de combustión (Hiegl *et al.* 2011).

El desarrollo de procesos controlados de conversión térmica requiere estudiar la influencia de la forma, tamaño y densidad de las partículas en la conversión de la biomasa. En una unidad de pirólisis rápida la biomasa que va a ser procesada normalmente tiene un rango amplio de formas y tamaños. Diferencias en los tamaños y formas de las partículas resulta en diferencias en las áreas de la superficie y volúmenes, las cuales son características

que directamente afectan el fenómeno de transferencia de masas y calor y las tasas de oxidación y volatilización. Además, las formas irregulares de las partículas de la biomasa ponen en riesgo el funcionamiento apropiado de los reactores alimentadores en la gasificación, combustión y pirólisis.

Cadoso *et al.* (2013) estudiaron el efecto del tamaño de partícula del bagazo del sorgo dulce en las propiedades físicas (densidad, tamaño, relación de aspecto y distribución de los áreas redondas) usando tres rangos de tamaños (125-135, 355-500 y 500-800 μm). Los resultados demostraron que las relaciones de aspecto fueron similares, diferentes tamaños de partículas tuvieron formas similares, la relación entre las dimensiones de la partícula no cambió significativamente con la disminución del tamaño de partícula y los tamaños de las partículas más pequeñas se relacionaron con el valor de redondez.

Oxidos de alkali, haluros (o halogenuros) y el contenido de cenizas pueden ser un problema cuando la materia prima se dirige a la combustión, porque estos elementos pueden provocar escoriación y el ensuciamiento los calentadores. La solución para contrarrestar el contenido del alkali de biomasa vegetal, incluye la adición de químicos para neutralizar al alkali, mezclando biomasa con alto contenido de alkali con biomasa con bajo contenido de alkali para alcanzar una aceptable temperatura de fusión de cenizas de la mezcla resultante y la eliminación del contenido de alkali con técnicas de lavado. El lavado de biomasa de sorgo (50 % de contenido de humedad) con agua corriente a temperatura ambiente tiene el potencial de mejorar la calidad de la biomasa del sorgo para la combustión a niveles cercanos a los que se encuentran para evitar SLAGGING AND FOULING de los calentadores. La significativa reducción de potasio y cloro junto con la inherente bajos niveles de azufre presentes en la biomasa de sorgo, ofrecen un gran potencial para su uso como proceso de lavado a una escala comercial. Sin embargo, la adición de agua a la biomasa como un pretratamiento es de preocuparse porque la cantidad de energía requerida para secar la biomasa antes de la combustión. De todas maneras, si la biomasa se lava se mezcla a relativas bajas concentraciones con los combustibles secos, el secado puede no requerirse, siempre y cuando la humedad en el combustible esta dentro de los límites razonables para la combustión. Por estas razones, se necesita mayor investigación para tener confiabilidad en la determinación de la óptima cantidad de agua necesaria para alcanzar la mejor calidad de la biomasa de sorgo, al mismo tiempo que se reducen las pérdidas de materia seca. Además, el análisis de lixiviados después del lavado se necesita para determinar su potencial uso como fertilizante para una producción de sorgo sustentable en un sistema de producción de ciclo cerrado (Carrillo *et al.* 2014).

La combustión de biomasa da como resultado la generación de bioenergía (energía eléctrica) y calor. Actualmente la forma más práctica de utilizar el bagazo de sorgo dulce parece ser en combustión para la producción de calor y/o electricidad. Como combustible, el bagazo de sorgo dulce tiene un valor calorífico de 16 MJ/kg de materia seca. Dependiendo del contenido de humedad del material, el valor calorífico real por kg de bagazo fresco se encuentra en rangos de 6.7 MJ, con un contenido de materia seca de 47%, a 10.1 MJ con un contenido de materia seca de 65%. Al utilizar el bagazo como combustible sólido, se obtuvieron 160 GJ/ha, lo que equivale a 4,400 litros de combustible para calefacción (Grassi 1992).

Gunnerman *et al.* (1986) mencionaron que la variedad de sorgo es importante con el fin de producir un producto combustible que se queme de forma limpia y eficiente. La variedad debe tener al menos 5% en peso de azúcar extraíble, menos de 0.75% (peso seco) de nitrógeno total y debe producir al menos once toneladas (peso seco) de biomasa por hectárea. El contenido de nitrógeno de la planta es especialmente importante. La planta seleccionada debe ser suficientemente baja en nitrógeno para evitar la producción excesiva de óxidos de nitrógeno durante la combustión del producto final. El bagazo se puede almacenar en una forma eficiente y rentable por su transformación en pellets para uso futuro.

Subproductos

Además de su uso para fines energéticos, el sorgo dulce también se valora para la elaboración de productos comerciales, tales como el alcohol (potable y de calidad industrial), jarabes (fructosa natural y alta), glucosa (líquido y polvo), almidones modificados, maltodextrinas, azúcar morena, sorbitol y ácido cítrico (productos derivados de almidón) (CFC-ICRISAT 2004). La malta de sorgo se puede utilizar como una buena alternativa para alimentos para bebé y para la producción de cerveza, así como bebidas no alcohólicas. Por otra parte, debido a su contenido de fibra, el sorgo dulce se puede utilizar para lechos de pollo, techos, cercas y ha demostrado ser adecuado para el uso en la industria de papel de acuerdo con Sundara y Marimuthu (2012).

Para producir combustible en gel, el etanol desnaturalizado se mezcla con un agente espesante (celulosa) y agua a través de un proceso técnico muy simple, lo que resulta en un gel combustible. El combustible en gel es, pues, renovable y se puede producir a nivel local en la mayoría de los países de África. Combustibles líquidos gelificados y/o solidificados (queroseno y etanol) se han usado desde la Segunda Guerra Mundial, cuando fueron utilizados por los soldados para cocinar. Existen diversas variaciones de etanol gelificado, se han producido en pequeñas cantidades en varios países como productos de gama alta con aplicaciones recreativas (camping, barbacoa al fuego, etc) y aplicaciones de restauración (Utría 2004). La ventaja de gel combustible es que no emite humo ni sustancias tóxicas.

Sustentabilidad del Sorgo Energético

En este capítulo se ofrece una visión general de la cadena de valor del sorgo energético y aborda los impactos sociales, económicos y ambientales de las cadenas de valor seleccionadas del sorgo dulce. El objetivo principal es por lo tanto en las diferentes escalas de los sistemas de producción de etanol de primera generación del sorgo dulce en regiones

tropicales de los países en desarrollo, así como de biogás y sistemas de bioetanol de 2ª generación de sorgo biomasa en las regiones templadas de los países desarrollados.

Revisión de las Cadenas Productivas del Sorgo Energético

El sorgo energético es un cultivo energético prometedor tanto en los países desarrollados y en vías de desarrollo. Es conveniente para el cultivo a pequeña y gran escala y cadenas de valor. La cadena de valor general de los sistemas de producción de sorgo energético es similar a otros sistemas de producción bioenergía/biomasa:

- Cultivo
- Cosecha
- Transporte
- Molienda (solo para la producción de etanol)
- Procesamiento del combustible
- Uso directo o su posterior transporte
- Uso Final

Una revisión esquemática de la producción y el uso del sorgo dulce, así como sus rutas generales se muestra en la Figura 22. El ciclo de vida del sorgo dulce incluye la producción de campo, procesamiento, uso y también tratamiento al final del ciclo de vida, reciclaje y disposición final (enfoque “de la cuna a la tumba”). Todas las entradas y salidas en el sistema se tienen en cuenta, incluyendo los subproductos obtenidos.

La cadena de valor se caracteriza por el proceso de conversión y los principales productos y subproductos. La tecnología de conversión y los productos deseados influyen en la escala del sistema de producción. De este modo, una diferenciación entre los pasos de conversión debe realizarse, ya que la escala no es necesariamente la misma para las diferentes etapas de la cadena de valor. Sin embargo, la frontera entre la gran y pequeña escala es amplia. Por lo general los sistemas de pequeña escala describen las cadenas de valor que involucran a muchos agricultores individuales que proporcionan la materia prima para una pequeña planta de etanol, por ejemplo, operada por una cooperativa de agricultores. Un sistema a gran escala se caracteriza por la participación de los grandes inversionistas, el cultivo de la materia prima en la escala agroindustrial moderna, a menudo realizado por la pro-

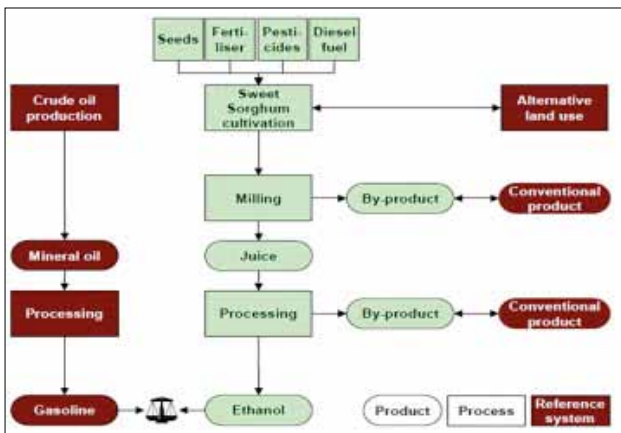


Figura 22: Comparación básica de los principios de los ciclos de vida del etanol de sorgo dulce y la gasolina (Braconnier and Reinhardt 2013)

pia empresa dueña de la planta de etanol. El etanol del sistema a gran escala a menudo se vende en los mercados internacionales de productos básicos. La escala de los pasos de la cadena de valor y los sistemas de producción son importantes, ya que influye en gran medida los impactos sociales, económicos y ambientales del sistema (Rutz y Janssen 2012a). Dependiendo de la perspectiva de los actores de las cadenas de valor esto puede incluir impactos positivos y negativos.

Por último, la aplicación de las tecnologías de conversión está influenciada por las condiciones climáticas en las que se cultiva el sorgo dulce, así como por el estado de desarrollo del país. En los climas tropicales la productividad de azúcar de sorgo dulce es muy alta y por lo tanto, los pequeños sistemas de producción de etanol primera generación o a gran escala son adecuados. En las regiones templadas, el contenido en azúcar es inferior, pero la productividad de la biomasa es alta. Por lo tanto, el sorgo dulce se utiliza actualmente en estas zonas para la producción de biogás. Actualmente la producción de biocombustibles de segunda generación aún no se realiza a una escala totalmente comercial. En general, la producción de biocombustibles de segunda generación es más adecuada para las regiones templadas, en las condiciones marco actual, debido a las alta inversión. En general, los siguientes parámetros caracterizan los sistemas de conversión agrícolas y de la cadena de etanol de sorgo dulce que tienen un gran impacto en las cuestiones de sostenibilidad (Rutz y Janssen 2012b):

Escala del Sistema: Pequeño, Mediano o Gran Escala.

Agentes del Sistema de Cultivo: Agricultores, Agricultura Industrial.

Agentes de los Sistemas Productivos: Pobladores, Planta de Etanol Centralizada.

Relaciones Empresariales entre Agentes: Modelo de pequeñas plantaciones, Cooperativas, Contrato de trabajadores.

Economía del País: País Emergente, País en Desarrollo.

Sistemas Tropicales de Producción.

La sostenibilidad del cultivo y la transformación de sorgo dulce en el clima subtropical y tropical, se ve afectada por diversos factores. Dado que muchas zonas de cultivo potenciales de estas regiones climáticas son ya sea en desarrollo o los países emergentes, los impactos socio-económicos, negativos o positivos, son de una importancia muy alta. De este modo, „las regiones tropicales“ y „países en desarrollo“ no son sinónimos, por supuesto, pero estas regiones climáticas son especialmente propensas a los efectos del cambio climático que puedan afectar a las personas más pobres, es decir, los agricultores de pequeña escala y de subsistencia en los países en desarrollo.

Un enfoque de las cadenas de valor del sorgo dulce en climas subtropicales y tropicales para la producción de energía se encuentra en la producción de etanol de primera generación. La siguiente lista muestra los escenarios de producción de etanol de 1ª generación:

Sistema centralizado de producción de etanol (en pequeña escala y producción de materia prima a gran escala para una planta de etanol a gran escala). Simplemente el cultivo y la cosecha de sorgo dulce se realiza a nivel de pequeñas comunidades. Después de la cosecha, los tallos de sorgo dulce se transportan desde las poblaciones a las instalaciones centralizadas de etanol.

Sistema descentralizado de producción de jarabe (producción de materia prima y jarabe a pequeña escala para una planta de etanol a gran escala). Además del cultivo y la cosecha de sorgo dulce, también la producción de jarabe de jugo de sorgo dulce se realiza a nivel de las comunidades. Posteriormente, el jarabe se transporta desde las poblaciones a las instalaciones centralizadas de etanol. Este sistema tiene ventajas si la infraestructura para el transporte de la biomasa de grandes unidades de producción centralizados es insuficiente o no existe y proporciona una mayor creación de valor a nivel de las poblaciones. Una visión esquemática del sistema de producción de jarabe descentralizado se presenta en la Figura 23.

Sistema descentralizado de producción de etanol (materia prima, jarabe y producción de etanol a pequeña escala). En este sistema, toda la cadena de producción se realiza a nivel local, es decir, el cultivo y la cosecha de sorgo dulce, la molienda de los tallos para producir jugo y el procesamiento del jugo en etanol. De este modo, el sistema proporciona la máxima creación de valor y beneficio en las comunidades.

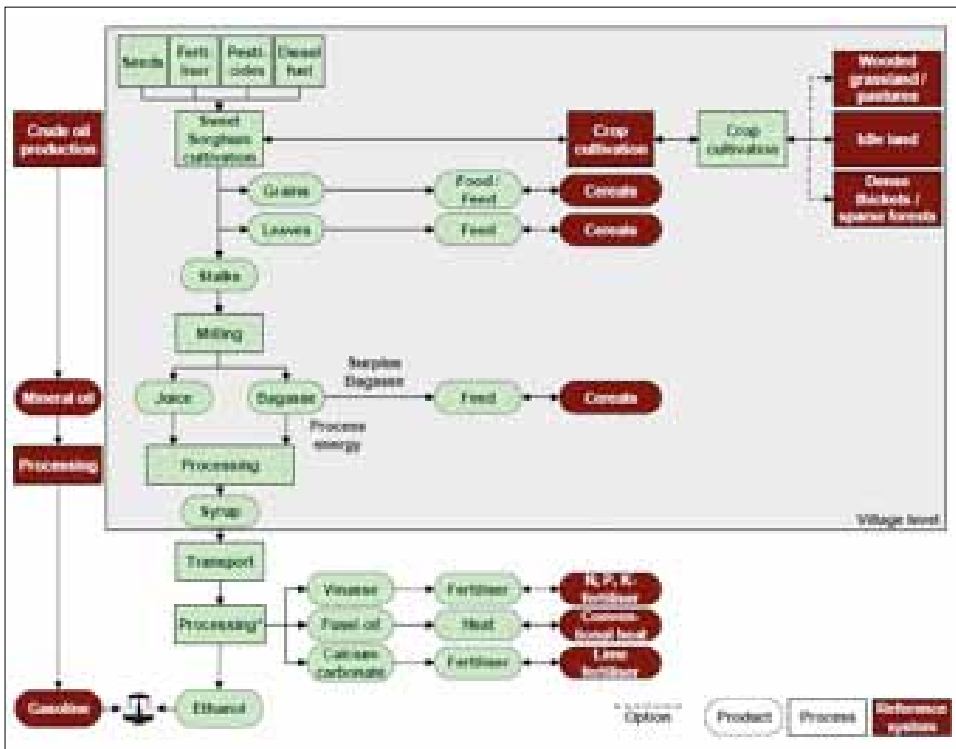


Figura 23: Sistema descentralizado de producción de jarabe (Braconnier and Reinhardt 2013)

Sistemas de Producción en Climas Templados

Los sistemas de producción en las regiones templadas son diferentes a los de las regiones tropicales, debido a que el contenido de azúcar cosechado es menor y con frecuencia demasiado bajo para la extracción y el procesamiento de azúcar a etanol de 1ª generación. Sin embargo, el sorgo biomasa es una buena materia prima para la producción de biogás por el alto contenido de azúcares, en comparación con otros cultivos, hace que sea muy deseable (Rutz *et al.* 2013).

Para la producción de biogás, la biomasa de sorgo dulce se tritura después de la cosecha. El biogás se utiliza como sustituto de la producción convencional de calor y energía o como combustible para el transporte en sustitución

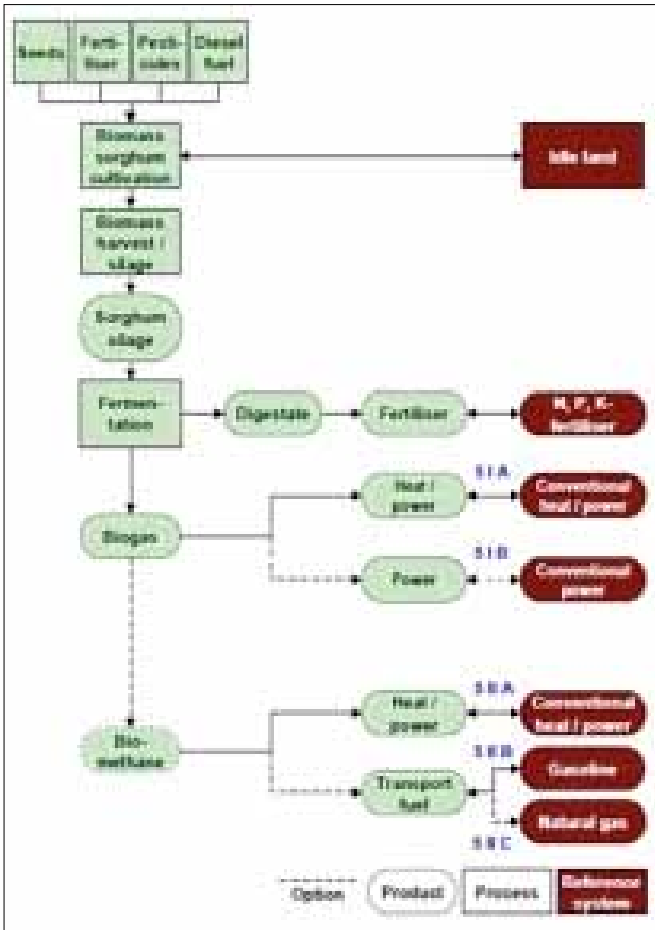


Figura 24: Sistema de Producción de Biogás (Braconnier and Reinhardt 2013)

de la gasolina y el gas natural convencional. En todos los procesos, se produce un digestato como subproducto. Se utiliza como abono reemplazando fertilizantes minerales. Una visión general esquemática del sistema de producción de biogás se presenta en la Figura 24.

Una opción a futuro sería el uso de sorgo dulce para biocombustibles de segunda generación, ya sea para la termoquímica o conversión biológica. Sin embargo, esto todavía no se aplica comercialmente. Por lo tanto, es difícil de discutir sobre sus impactos, sobre todo porque el costo de la producción es difícil de predecir. Una visión general esquemática del sistema de producción de lignocelulosa-etanol se presenta en la Figura 25.

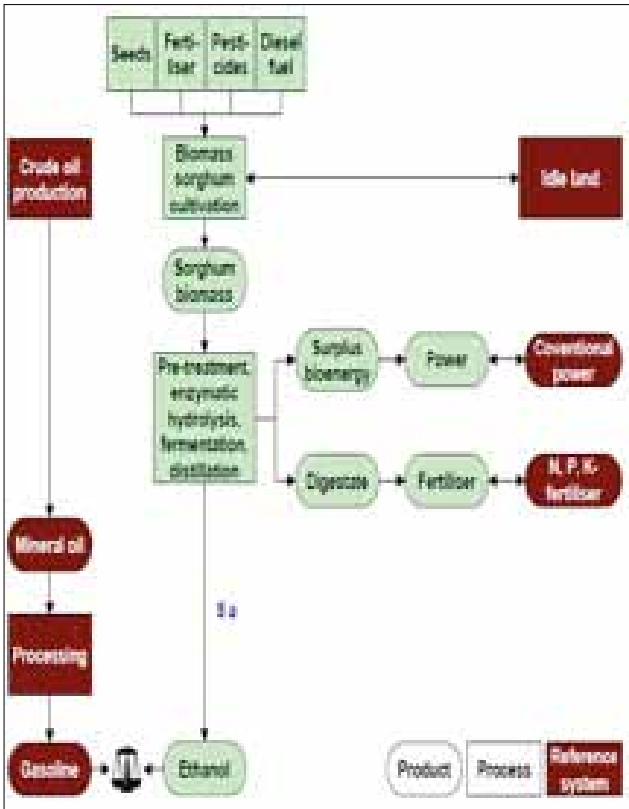


Figura 25: Producción de etanol de segunda generación a partir de lignocelulosa de sorgo dulce en climas templados (Braconnier and Reinhardt 2013)

Impactos Económicos

Tres de los criterios más importantes para la sostenibilidad económica son la rentabilidad (el precio del biocombustible excede los costos de producción), la equidad (distribución de beneficios o valor añadido entre los actores a lo largo de una cadena de valor de la biomasa-biocombustibles o a través de las generaciones) y la eficiencia (la cantidad máxima de rendimiento se obtiene con una cantidad dada de recursos). El imperativo de la sostenibilidad requiere que consideremos claramente estos criterios, tanto a corto como a largo plazo. Por lo tanto, desde la perspectiva de la sostenibilidad, el primer objetivo es asegurar la viabilidad económica a largo plazo del sistema productivo.

Rentabilidad Económica y Equidad

El primer criterio para la viabilidad a largo plazo de un sistema de producción que utiliza recursos para producir una salida comercial es que muestra la rentabilidad económica: los productores sólo estarán dispuestos a continuar la producción de biocombustibles si es económicamente rentable. Los factores clave que pueden afectar la rentabilidad incluyen usos alternativos competitivos de las materias primas y los precios de la energía. Los usos alternativos de la materia prima juegan un papel importante en el proceso de toma de decisiones de los productores. Si los precios de los biocombustibles están por debajo de los precios de otros posibles productos finales (alimentos, piensos, madera, etc) sería más rentable cultivar estos productos que para derivar el combustible de la materia prima. En consecuencia, sus precios determinan el precio mínimo para los biocombustibles. Para ser rentable y competitiva con los combustibles fósiles, los costes de producción de biocombustibles tienen que estar por debajo del precio del petróleo equivalente. Por lo tanto, los precios del petróleo fijan un precio máximo para el precio

de los biocombustibles. Si los costos superan este valor, los biocombustibles tendrán un precio fuera del mercado de forma automática (Schmidhuber, 2007). Los costos de producción estimados de los biocombustibles muestran diferencias significativas en función de factores tales como la escala de las plantas, complejidad de la tecnología, las fuentes de energía y los costos de materias primas (Elbehri *et al.* 2013).

Por el momento, en Brasil el bioetanol se considera económicamente competitivo en comparación con el petróleo, lo que todavía no es el caso en otras partes del mundo.

Impactos seleccionados sobre la generación de beneficios y la equidad de sorgo dulce en las regiones tropicales y templadas se presentan en el Cuadro 7 y Cuadro 8.

Cuadro 7: Impactos sobre las ganancias de sorgo dulce en los sistemas a grande y pequeña escala de la producción de bioetanol de 1ª generación (Rutz *et al.* 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	Dado que los pequeños productores no están involucrados, no hay generación de ingresos para los agricultores locales a menos que la agricultura por contrato pueda ser establecida. Los ingresos para los operadores de la planta son generalmente más grandes en las plantas más grandes. Debido a la mayor eficiencia y economías de escala, la calidad de los productos puede ser mejor y los precios del producto final más bajos.
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	En función de los contratos, los pequeños productores pueden tener la seguridad de que el operador de la planta compre su materia prima, generando así un ingreso estable. Sin embargo, la venta de los tallos depende de la planta de etanol centralizada que es la compradora de los tallos. Si solo existen algunas fábricas locales, los agricultores no tienen ninguna influencia sobre los precios de la materia prima y por tanto son vulnerables.
Cultivo y conversión a pequeña escala	Una cadena de valor más prolongada para producir etanol a menor escala genera ingresos más locales en comparación con la venta de los tallos o jarabe, solamente. Los pequeños agricultores pueden decidir por sí mismos si el etanol es vendido a los mercados externos o también se utiliza para el consumo local, por ejemplo para cocinar. De este modo, se aumenta el acceso a la energía moderna.

Cuadro 8: Impactos sobre las ganancias de sorgo dulce en la producción de biogás y biocombustibles de 2ª generación en regiones templadas (Rutz *et al.* 2013)

Producción de Biogás	Las plantas de biogás son de menor tamaño que las plantas de biocombustibles de 2ª generación. Por lo tanto, más personas (agricultores) se benefician de mayores ingresos, especialmente debido a que suele ser el productor de materia prima al mismo tiempo el operador del equipo. Sin embargo, los ingresos dependen de los sistemas de apoyo público. La utilización de sorgo dulce en lugar de otros cultivos no tiene un impacto real en las ganancias
Biocombustible de 2ª Generación	Los beneficios son bastante inciertos ya que no existe ninguna planta comercial real de biocombustibles de 2ª generación. La utilización de sorgo dulce en lugar de otros cultivos no tiene un impacto real en las ganancias.

Eficiencia total del proceso

La eficiencia de la cadena de valor depende especialmente de la escala de los pasos de producción individuales, así como de las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas e industriales. Eficiencias globales son comparables al etanol de la caña de azúcar o la remolacha, aunque pueden ser un poco más bajo (Vecchiet, 2010).

Impactos seleccionados sobre la eficiencia de las cadenas de valor en las regiones tropicales y templadas se presentan en el Cuadro 9 y Cuadro 10.

Cuadro 9: Impactos en la eficiencia de las cadenas de valor del sorgo dulce para la producción de bioetanol de 1ª generación a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	El cultivo y la conversión a gran escala del sorgo dulce aumentan la eficiencia global de la cadena de valor. Esto se debe a los efectos de escalas y debido a las mayores inversiones generales. Por otra parte, el acceso a semillas mejoradas, insumos y tecnología está generalmente disponible. La recolección se puede hacer con maquinaria eficiente. El proceso de conversión es generalmente eficiente, especialmente para plantas nuevas y modernas.
Cultivo pequeña escala y conversión a gran escala	Los pequeños agricultores podrán aprovechar mejor el material de entrada, tales como semillas, pesticidas, fertilizantes, etc. a partir de la planta de etanol a gran escala. Esto aumenta la eficiencia global de la producción agrícola. A medida que la producción de etanol es en gran escala, la eficiencia es generalmente más alta. Sin embargo, los pequeños agricultores pueden ser vulnerables a la dependencia de semillas mejoradas proporcionadas por la planta de etanol a gran escala. La planta de etanol a gran escala también puede proporcionar capacitación para los agricultores.
Cultivo y conversión a pequeña escala	A menudo los agricultores no están capacitados en buenas prácticas agrícolas para aumentar los rendimientos. Si no está debidamente capacitados, por ejemplo sobre la aplicación de los pesticidas, los impactos ambientales y sanitarios negativos pueden ocurrir y la eficiencia se reduce. Por otra parte, el acceso a variedades mejoradas de sorgo dulce puede ser limitado para los agricultores a pequeña escala. Los pequeños agricultores son vulnerables a la dependencia de semillas mejoradas (por ejemplo, semillas híbridas y GMO). El cultivo de sorgo dulce y la producción de etanol en pequeña escala suele ser menos eficiente que en las escalas más grandes.

Cuadro 10: Impactos en la eficiencia de la cadena de valor del sorgo dulce en la producción de biogás y biocombustibles de 2ª generación en regiones templadas (Rutz et al. 2013)

Producción de Biogás	El uso eficiente de la tierra en la producción de biogás (biometano) de sorgo dulce es mayor que de otros biocombustibles de primera generación (por ejemplo, el biodiesel de colza o el etanol a partir de la remolacha azucarera), especialmente en el sector del transporte. Si el biogás se utiliza en una unidad de cogeneración para producir electricidad, se debe también aprovechar el "calor residual". Este es actualmente un cuello de botella en varias plantas de biogás europeas.
Biocombustibles de 2a Generación	Datos reales sobre la eficiencia de los biocombustibles segunda generación son difícilmente disponibles, especialmente si el sorgo dulce se considera como materia prima

Inversiones Necesarias para la Instauración del Sistema y su Operación

El sorgo dulce puede cultivarse con recursos financieros muy bajos. Los agricultores necesitan tierras agrícolas y semillas para cultivar la planta. La planta puede reproducirse fácilmente por semillas. Sin embargo, una buena productividad y eficiencia del cultivo necesitan ingresos tales como el trabajo humano, la energía, fertilizantes, y pesticidas, y por lo tanto requieren recursos financieros.

Incluso si la producción de materia prima se puede hacer a un costo muy bajo, se necesitan importantes recursos financieros para las etapas de procesamiento adicionales, como el transporte, la molienda y la conversión a etanol. En general se puede decir que cuanto más grande es el sistema, mayores son los recursos financieros. Sin embargo, la disponibilidad de recursos financieros es a menudo un factor limitante clave, especialmente en los países en desarrollo. El Cuadro 11 muestra los efectos de las cadenas de valor del sorgo dulce en el clima tropical seleccionados.

Cuadro 11: Impacto en la inversión de sistemas de producción de bioetanol de 1a generación a base de sorgo dulce a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	Las instalaciones grandes necesitan mayores inversiones. Los inversionistas en los países en desarrollo que están interesados en la producción de etanol son muy limitados. Si los inversionistas extranjeros tienen la intención de invertir en sistemas de etanol a gran escala, son susceptibles a ser nombrados "usurpadores". La inestabilidad política y la falta de infraestructura adecuada hacen que las inversiones sean riesgosas.
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	Existen modelos en que el operador de la planta de etanol proporciona recursos para un cultivo eficiente de la materia prima por los pequeños agricultores. Sin embargo, estos acuerdos no se pueden llevar a cabo de una manera justa, ya que las partes involucradas a menudo no están al mismo nivel.
Cultivo y conversión a pequeña escala	El acceso a los insumos agrícolas (fertilizantes, pesticidas) es caro y limitado para los agricultores a pequeña escala. Equipo para la producción de etanol (prensas, las destilerías, etc.) puede ser demasiado caro para los pequeños productores.

Impacto Social

La dimensión social de la sostenibilidad de los biocombustibles se relaciona con el potencial para el desarrollo rural, la reducción de la pobreza y el crecimiento inclusivo. La dimensión social (o socio-institucional) de la sostenibilidad de los biocombustibles puede tocar en muchas cuestiones potencialmente interrelacionadas. Esto plantea una serie de dificultades metodológicas, incluyendo el desafío de distinguir entre las cuestiones sociales directas e indirectas. En esta sección, nos centramos en los siguientes aspectos de la sostenibilidad social: los derechos de propiedad de la tierra, creación de empleo, salud y condiciones de trabajo, la contribución al desarrollo rural y los ingresos nacionales

y la aceptación del público y la aceptación de los actores involucrados. Todas estas cuestiones más o menos abordan un objetivo común - la necesidad de integrar a los agricultores de pequeña escala dentro del desarrollo de biocombustibles y garantizar la distribución de beneficios inclusive, la salvaguarda de los derechos fundamentales y los medios locales de subsistencia como consecuencia de la introducción de los biocombustibles.

Seguridad Alimentaria y Energética

En comparación con los actuales cultivos de azúcar y almidón para la producción de bioetanol, el sorgo dulce ofrece ventajas importantes con respecto a la seguridad alimentaria, ya que puede servir como cultivo multipropósito para alimentos, piensos y combustible al mismo tiempo. Sus semillas son valiosos cereales y las hojas son alimento de alto valor, lo que contribuye significativamente a mejorar la oferta de alimentos y mejorar la seguridad alimentaria, especialmente en las zonas rurales de los países en desarrollo que son propensos a la inseguridad alimentaria. Además de los cereales utilizados para el consumo humano o animal, en el sorgo dulce se acumula azúcares con poca competencia entre la producción de grano y azúcar. El bagazo se puede utilizar como alimento para animales y se ha reportado que tienen un mayor valor nutritivo que el bagazo de la caña de azúcar (Almodares y Hadi, 2009).

La producción de bioetanol en base a cultivos de alimentos tradicionales puede llevar a aumentos de precios de los productos agrícolas que afectan negativamente el acceso a la alimentación, especialmente en los países en desarrollo importadores netos de alimentos y para los más pobres en el mismo. Aumentos de precios importantes ya se han producido en los principales mercados de bioetanol a base de cultivos alimenticios tales como el maíz y el azúcar.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, la seguridad alimentaria está influenciada por cuatro aspectos principales: disponibilidad, acceso, estabilidad y utilización (FAO, 2007). De este modo, la disponibilidad de alimentos puede verse amenazada por la producción de bioetanol a través de la competencia con la producción de alimentos sobre la tierra, el agua y otros recursos productivos. Este recurso de competencia de los recursos presentes entre azúcar y almidón como materia prima, se reducirán con las tecnologías de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica. El acceso a los alimentos (la capacidad de los hogares para comprar alimentos) es afectado si los precios de los alimentos suben más rápido que los ingresos reales, lo que lleva a la inseguridad alimentaria.

Por último, el sorgo dulce puede estar asociado con los sistemas agrícolas (por ejemplo, caña de azúcar) existentes, aumentando así la productividad (energía, alimentos y piensos) y conducir a una revitalización de la producción agrícola que actualmente está sufriendo de una baja inversión y la baja productividad, sobre todo en zonas rurales de los países en desarrollo (Janssen *et al.* 2009).

Algunos impactos seleccionados del sorgo dulce en los sistemas de producción de etanol primera generación de grandes y pequeña escala en las regiones tropicales en la alimentación y la seguridad energética se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12: Impacto en la seguridad alimentaria y energética de los sistemas de producción de bioetanol de primera generación utilizando sorgo dulce en pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	Los sistemas de gran escala pueden contribuir al desarrollo regional si logra extenderse a los más pobres de la región y por lo tanto, podría conducir a un mayor acceso a los alimentos. Por otra parte, si la población local no se está beneficiando del sistema de producción a gran escala, existe el riesgo de que el acceso a alimentos y también la disponibilidad en la región se reduzca.
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	Los agricultores podrían generalmente también beneficiarse del aumento de los precios de los alimentos, ya que los ingresos del cultivo de sorgo dulce son mayores. Esto se aplica sólo si la planta de etanol proporciona altos precios a los agricultores.
Cultivo y conversión a pequeña escala	El cultivo de sorgo dulce puede aumentar los ingresos de los pequeños agricultores, lo que conduce a un mayor acceso a los alimentos. Los agricultores podrían también beneficiarse del aumento de precios de los alimentos, ya que los ingresos del cultivo de sorgo dulce son mayores. El sorgo dulce enriquece la diversidad de productos agrícolas de los pequeños agricultores, lo que reduce los riesgos si se cultivan sólo uno o pocos cultivos. El sorgo dulce es comestible y se puede utilizar como cultivo de usos múltiples para el consumo propio, que no es posible con otros cultivos (tóxicos) como la jatropha.

Derechos de Propiedad de la Tierra

El cambio climático y la expansión de la producción de biocombustibles es probable que conduzcan a una mayor competencia por el acceso a la tierra. Este aumento de la competencia supone una amenaza para los medios de vida de los millones de agricultores, pastores, pescadores y habitantes de los bosques que viven en zonas sin derechos formales de tenencia de la tierra. Las políticas y la planificación de la tenencia de la tierra serán cruciales. Dado que la tierra es un recurso limitado, el uso adecuado de esta depende del valor que puede proporcionar a los que posean derechos sobre ella. Este valor se puede medir de muchas maneras, por ejemplo, la generación de riqueza, la conservación y el mantenimiento de los ecosistemas. Se entiende que los biocombustibles ofrecen oportunidades comerciales para aumentar la contribución de las tierras a individuos, grupos y gobiernos. Acceso a la tierra (el uso o la propiedad) depende de las decisiones de aquellos que poseen derechos sobre la tierra. Estos derechos pueden estar relacionadas con el derecho de propiedad o uso (por ejemplo, el pastoreo, o explotación de recursos hídricos) y pueden basarse en la legislación nacional, el derecho consuetudinario o combinaciones de ambos. En realidad, los derechos sobre la tierra y los procesos para obtener acceso a la tierra son a menudo confusos. Muchos gobiernos han expresado su esperanza de que el desarrollo de cultivos energéticos pudiera abrir la posibilidad de la utilización de tierras improductivas. Sin embargo, la adquisición de tierras, aunque no actualmente para la producción de cultivos, puede plantear problemas si las comunidades rurales, que pueden tener reclamos históricos sobre la tierra para recoger leña o para el pastoreo, son incapaces de proteger esos reclamos ya que se basan en el derecho consuetudinario y los sistemas informales de tenencia. Como resultado, existe el riesgo de que la expansión de los cultivos energéticos pueda dar lugar a la expulsión de los grupos vulnerables o propietarios sin documentación. Esto es aún más probable

en virtud de decretos gubernamentales o de los altos precios de la tierra (alquiler o venta) por lo que los más pobres generalmente son expulsados del mercado. También existe el efecto negativo potencial sobre la especulación de la tierra, por la simple adquisición de tierras para biocombustibles. Tal especulación, si no es controlada y regulada, puede crear dificultades para pequeños agricultores y la agricultura en general. Tales impactos indirectos pueden producirse a nivel local, nacional, o a través del comercio internacional, incluso a nivel mundial (Elbehri *et al.* 2013).

Creación de Empleos, Salud y Condiciones de Trabajo

En general, la producción de biocombustibles genera más oportunidades de empleo y puestos de trabajo que la producción de combustibles fósiles, ya que el procesamiento se lleva a cabo en una escala menor e involucra a más personas. Esto también se aplica a la utilización de sorgo dulce para la producción de bioenergía. El ejemplo de una planta de etanol a partir de sorgo dulce en Uganda, la cual esperaba generar hasta 250 puestos de trabajo, en el distrito de Kayunga para el funcionamiento de una planta de etanol con una producción de 20 millones de litros de etanol al año (Muzaale de 2011; Uganda Investment Forum, 2013.). Sin embargo, hay que reconocer que estas cifras son proyectadas, los datos reales no estaban disponibles para los autores. Además de los trabajadores directos en la instalación, 6,000 agricultores han recibido semillas de sorgo dulce para sus siembras (Muzaale, 2011).

Además de la posibilidad de generar empleos, los problemas de salud y las condiciones laborales deben ser tomados en consideración, sobre todo en los países en desarrollo. Sin embargo, esto se aplica a cualquier empresa, independientemente de si se encuentra en el sector de biocarburantes u otros sectores. En general, no se espera que el cultivo y procesamiento de del sorgo dulce tenga impactos negativos mayores sobre temas de salud y condiciones de trabajo al igual que en la producción y procesamiento de otros cultivos. Impactos seleccionados del sorgo dulce en la creación de empleo, la salud y las condiciones de trabajo en las regiones tropicales y templadas se presentan en el Cuadro 13 y Cuadro 14.

Cuadro 13: Impacto de los sistemas de producción de bioetanol de 1a generación de sorgo dulce a pequeña y gran escala sobre la creación de empleo, la salud y las condiciones laborales en regiones tropicales (Rutz *et al.* 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	En los sistemas centralizados (con tecnologías de recolección mecánica) pueden ser necesarios menos trabajadores, por tanto, menos oportunidades de trabajo se crean. La cosecha mecánica evita el trabajo duro y peligroso. Las empresas más grandes tienen, por un lado que cumplir con las normas más estrictas sobre la salud y las condiciones de trabajo, esto es, sin embargo, a menudo no implementado, especialmente en los países en desarrollo.
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	En la etapa de cultivo se necesitan más trabajadores que en el sistema a gran escala. En la etapa de conversión se necesitan sólo un poco más de trabajadores (debido a una mayor administración para hacer frente a muchos pequeños agricultores).
Cultivo y conversión a pequeña escala	Debido a tasas más bajas de mecanización generales del proceso de conversión, más empleo se genera por litro de etanol que en sistemas más grandes. La producción de etanol a nivel de pequeña escala no sólo crea empleo directo en la cadena de valor, sino también el empleo indirecto a través de microempresas relacionadas. Los agricultores más pequeños pueden influir en sus condiciones de trabajo.

Cuadro 14: Impactos de la producción de biogás y biocombustibles de 2a generación de sorgo dulce en la creación de empleos, salud y condiciones de trabajo en regiones templadas (Rutz et al. 2013)

Producción de Biogás	El cultivo de sorgo dulce para la producción de biogás no tiene de por sí ningún impacto en la creación de puestos de trabajo en comparación con otros cultivos para la producción de biogás. Sin embargo, debido a la menor escala de los sistemas de biogás, en comparación con los sistemas biocombustibles de 2 ^a generación, la producción de biogás genera por lo general más oportunidades de trabajo en comparación con los biocombustibles de 2 ^a generación. Las normas sobre seguridad de la salud y las condiciones de trabajo suelen aplicarse en los países más desarrollados.
Combustibles de 2a generación	Como toda la cadena de valor es a gran escala, menos empleos se pueden generar que en los sistemas más pequeños. Las normas sobre seguridad sanitaria y las condiciones de trabajo suelen aplicarse en los países más desarrollados.

Aceptación pública y de las partes interesadas

La aceptación pública es un requisito previo para el desarrollo de los biocombustibles. La percepción pública depende en gran medida de los aspectos culturales, la historia y la economía de los países productores, los objetivos de los países importadores, los objetivos ambientales y sociales, así como sobre los efectos positivos o negativos sobre las personas y las comunidades. El uso del sorgo dulce, no está todavía mucho bajo el debate público, ya que su uso para la bioenergía es actualmente aún pequeño. Por otra parte, además de la aceptación del público, también es necesaria la aceptación del cultivo por los actores del mercado de los biocombustibles. La utilización de sorgo dulce para la bioenergía es nuevo todavía y tiene poca aplicación en comparación con, por ejemplo la soya, el maíz y la caña de azúcar. Así, algunos agricultores que no hayan tenido hasta el momento experiencia con el sorgo dulce pueden dudar de producir este cultivo.

Impactos seleccionados en la aceptación del público y la aceptación de los actores del mercado de las cadenas de valor del sorgo dulce en regiones tropicales y templadas se presentan en el Cuadro 15 y Cuadro 16.

Impactos Ambientales

Los impactos ambientales más importantes a tener en cuenta para la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce son el balance de energía, gases de efecto invernadero y otras emisiones contaminantes, el uso directo e indirecto de la tierra, la biodiversidad, el uso del agua para la agricultura (bioenergía) y la huella de agua y la conservación de la capacidad de suelos productivos.

Balance de Energía

La contribución de cualquier biocombustible para el suministro de energía depende tanto del contenido energético del biocombustible y de la energía fósil entrando en su producción. Esto incluye la energía requerida para cultivar (fertilizantes, pesticidas, tecnología de riego, la labranza) y la cosecha de la materia prima, para procesar la materia prima en biocombustible, y para el transporte de la materia prima y el biocombustible resultante a

Cuadro 15: Aceptación pública y de las partes interesadas en la producción de bioetanol de 1a generación de sorgo dulce en sistemas a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013).

Cultivo y conversión a gran escala	A nivel local, la aceptación pública de los sistemas de producción a gran escala depende en gran medida de los beneficios asociados a la población local. Si el proyecto va acompañado de inversiones sostenibles en la infraestructura, la aceptación es mayor. A nivel internacional, el etanol a partir de sorgo dulce aún no es mencionado ampliamente en los medios de comunicación, debido a la baja en la actualidad del uso de sorgo dulce para producir etanol.
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	La aceptación pública depende principalmente de las condiciones ofrecidas por las grandes plantas de etanol para los agricultores. La cosecha manual de sorgo causa escozor. Por lo tanto, los agricultores a menudo dudan en cultivar el sorgo dulce.
Cultivo y conversión a pequeña escala	La aceptación pública de los sistemas más pequeños es generalmente alta, siempre y cuando el sistema sea operacional y siempre y cuando todas las partes involucradas se beneficien de ella. El cultivo de sorgo dulce para la producción de etanol puede ser relativamente nuevo para muchos agricultores, por lo que se necesitan campañas de sensibilización y formación. La cosecha manual de sorgo causa escozor. Por lo tanto, los agricultores a menudo dudan en cultivar el sorgo dulce.

Cuadro 16: Aceptación pública y de las partes interesadas en la producción de biogás y bioetanol de 2a generación de sorgo dulce en sistemas a pequeña y gran escala en regiones templadas (Rutz et al. 2013)

Producción de Biogás	La extensión del cultivo de maíz para la producción de biogás (por ejemplo, en Alemania) ha dado lugar a protestas públicas en áreas con alta densidad de maíz. Como el sorgo dulce tiene un aspecto similar al maíz, la aceptación pública de sorgo dulce en estas áreas puede ser reducida, debido a la percepción negativa sobre el maíz. La aceptación de sorgo dulce como cultivo energético por los agricultores depende de sus experiencias con el cultivo. Especialmente en las regiones templadas, el sorgo dulce es un cultivo relativamente nuevo para la producción de biogás.
Biocombustibles de 2a generación	Si la segunda generación se convierte en comercial, la gente puede preguntarse por qué el sorgo dulce, un cultivo anual, se debe utilizar para la producción de biocombustibles de segunda generación, en lugar de las plantas leñosas y residuos. El uso de bagazo de sorgo dulce sería bueno, pero estará disponible apenas en las regiones templadas en el futuro cercano. No está claro si el sorgo dulce, además, será aceptada por los operadores de plantas de plantas de biocombustibles de 2ª generación, ya que la experiencia es baja. Especialmente para las plantas de etanol 2ª generación, es difícil cambiar de una materia prima a otra, como las condiciones de fermentación biológicas tienen que ser modificados.

través de las diversas fases de producción y distribución. El balance energético fósil, que se define como la relación entre la producción de energía renovable de biocombustible resultante y aporte de energía fósil necesaria para su producción, es un factor crucial para juzgar la conveniencia del biocombustible derivado de la biomasa: esto mide hasta qué punto el concepto de biomasa es competente para cambiar combustibles fósiles. Un equilibrio energético de 1.0 indica que el requisito de energía para la producción de bioenergía es igual a la energía que contiene (Armstrong *et al.* 2002). Un balance energético de combustible fósil de 2.0 significa que un litro de biocombustible contiene el doble de la cantidad de energía que se requiere para su producción (Elbehri *et al.* 2013).

Las variaciones en los balances de energía fósil estimadas a través del sorgo dulce y combustibles difieren en gran medida con escenarios específicos y condiciones locales. En general, los resultados dependen de factores tales como la productividad de materia prima, localización de la producción, las prácticas agrícolas, cambio en el uso del suelo, el uso de los subproductos (por ejemplo, el bagazo), el tipo y la eficiencia de las tecnologías de conversión y el tipo de portadores de energía fósiles, que se sustituyen (Elbehri *et al.* 2013).

Varios estudios han investigado el balance energético de sorgo dulce para la producción de etanol cultivado bajo diferentes escenarios y condiciones locales. Worley *et al.* (1992) indican que es rentable, desde un punto de vista energético, para producir combustibles líquidos a partir del sorgo dulce. La relación de energía mejorada de sorgo dulce indica que, como el precio del combustible líquido aumenta con todas las demás variables constantes, el sorgo dulce ganará una ventaja económica. Reed *et al.* (1986) tuvo una producción promedio de energía al cociente de entrada de 2,83 para el sorgo dulce durante siete años en Nebraska EE.UU. El balance de energía calculado por Wortmann *et al.* (2008) fue de 3.63 en comparación con el sorgo de grano (1.50) y el maíz (1.53).

Rao Dayakar *et al.* (2004) también encontraron que el sorgo dulce tiene un balance elevado de energía neta. A pesar de que el rendimiento de etanol por unidad de peso de materia prima fue menor para el sorgo dulce en comparación con la caña de azúcar, los costos de producción y necesidades de agua mucho más bajos para este cultivo; el sorgo dulce todavía termina con una ventaja competitiva en el costo en la producción de etanol en la India.

Todos los estudios mencionados anteriormente, experimentados bajo diferentes condiciones demuestran que la producción de bioetanol a partir de sorgo dulce tiene un balance energético neto positivo, que puede contribuir de manera significativa a la conservación de los recursos fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Si el cultivo se utiliza para la producción de etanol (a partir de granos y azúcar) y la electricidad verde (en el exceso de bagazo), se pueden ahorrar 3,500 litros equivalentes de petróleo crudo por hectárea de cultivo. Si tanto los alimentos de granos y etanol del jugo se producen, 2,300 litros equivalentes de petróleo crudo se pueden ahorrar por área cultivada (hectárea). Incluso si se utilizan las semillas como alimento, el bioetanol a partir del jugo de azúcar de la madre sigue mostrando claras ventajas a los combustibles fósiles. Si tanto el azúcar y las semillas se usan como alimento, los respectivos gastos de gases de efecto invernadero de la energía y de conversión relacionadas podrían compensarse mediante la producción de etanol de segunda generación a partir del bagazo (Srinivasa Rao *et al.* 2009).

Emissiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes

La lucha contra el calentamiento global y la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es el principal motor para el desarrollo de biocombustibles. Los efectos negativos de las emisiones de gases de efecto invernadero sobre el clima se conocen desde hace mucho tiempo. Evaluaciones de las emisiones de GEI suelen incluir las de CO₂, el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y los halocarbonos. Los gases

se liberan durante el ciclo del biocombustible dependiendo de las prácticas agrícolas (incluyendo el uso de fertilizantes, pesticidas, cosecha, etc.), el proceso de conversión y distribución y el consumo final y uso de subproductos. Las preocupaciones sobre el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero se han convertido cada vez más importantes en la continuación de la política de apoyo a los biocombustibles. Por ello, la industria de los biocombustibles se requiere cada vez más para demostrar que el efecto neto de GEI es inferior cuando se considera todo el ciclo de vida, desde los cultivos a los automóviles. Mientras que las plantas absorben CO_2 de la atmósfera cuando están creciendo, lo que puede compensar el CO_2 que se produce cuando se quema el combustible, el CO_2 se emite también en otros puntos en el proceso de producción de biocombustibles.

El bioetanol de 1ª y 2ª generación a partir de sorgo dulce contribuye significativamente a la mitigación de gases de efecto invernadero: entre 1.4 y 22 kg equivalentes de dióxido de carbono en función de los rendimientos por área de cultivo, el método de producción, el tipo y la eficiencia de la tecnología de conversión, el uso de subproductos tales como bagazo, la cobertura del suelo antes del cultivo de sorgo dulce, y el uso del suelo (Elbehri *et al.* 2013).

La nitrificación y desnitrificación son las fuentes primarias de producción de óxido nítrico (N_2O) y las emisiones de los sistemas agrícolas y contribuye significativamente al calentamiento global. El bloqueo de la función de las bacterias nitrificantes o retrasar la función de los nitrificantes (es decir, la reducción de las tasas de nitrificación) puede reducir significativamente las pérdidas de nitrógeno asociadas a la nitrificación y extender la persistencia de nitrógeno como amonio en el suelo para la absorción por las plantas, conducir a la recuperación de nitrógeno mejorado y eficiencia en el uso de los sistemas agrícolas. Recientemente, se ha demostrado que algunas especies de plantas tienen la capacidad de liberar inhibidores de la nitrificación en las raíces que suprimen las funciones nitrificantes, un fenómeno denominado "inhibición biológica de la nitrificación" (BNI, por sus siglas en inglés) (Subbarao *et al.* 2006; 2009b). Los estudios de campo preliminares indican la posibilidad de que el sorgo silvestre, especies tales como *S. arundinaceum* actuando como una fuente genética para alta capacidad de BNI. La función de BNI en el sorgo por lo tanto, podría convertirse en un rasgo fundamental apuntado para el mejoramiento genético, como parte de una estrategia integrada hacia el desarrollo de variedades de sorgo con la capacidad adecuada BNI para suprimir la nitrificación del suelo y utilizar nitrógeno en forma de NH_4^+ (Subbarao *et al.* 2009a). Los estudios preliminares indican que los sorgos dulces tienen capacidad BNI similar a la del sorgo de grano, lo que indica que la función de BNI puede ser susceptible de mejora genética/manipulación para reducir las emisiones de N_2O y mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno en los sorgos dulces (Srinivasa Rao *et al.* 2009).

Cambio de uso de suelo (LUC)

El uso del suelo por el ser humano, que consiste en la gestión y la modificación del ambiente natural o un lugar natural en el entorno construido, como los campos, pastizales y asentamientos (Watson *et al.* 2000). El cambio del uso del suelo (LUC, por sus siglas en

inglés) es el cambio de la tierra utilizada de un uso a otro. A menudo, también se conoce el uso del suelo para el cambio de la tierra no utilizada (tierras vírgenes, tierras abandonadas, tierras degradadas) a otro uso.

Por lo tanto una distinción entre cambio de uso directo de la tierra y cambio de uso indirecto de la tierra. Cambio de uso directo de la tierra (dLUC) se refiere al cambio de una específica área que directamente se convierte de un estatus a otro. En el sector de los biocombustibles, dLUC se refiere a la producción de biocombustible a partir de la materia prima que se produce sobre una superficie directamente convertida de otro estatus a tierra arable para la producción de materia prima (EC 2010). Si la materia prima para biocombustibles o bio-productos es obtenida a través del cultivo de una tierra agrícola ya existente, y puede desplazar la producción de otro cultivo, algunos de los cuales al final dirigen a la conversión de la tierra en tierra agrícola. A través de esta ruta, la demanda extra de biocombustibles puede influir en forma indirecta al cambio en el uso del suelo, motivo por el cual recibe el nombre de cambio en el uso del suelo indirecto (iLUC) se dirige (EC2010). Este efecto indirecto se manifiesta en si mismo a través de un cambio en la demanda de productos agrícolas y sus sustitutos en mercados globales.

Una ventaja importante de sorgo dulce en comparación con otros cultivos es que puede crecer bajo condiciones más severas. Puede todavía ser bien cultivado en suelos marginales con un amplio rango de pH, la salinidad y la estructura del suelo que no son adecuadas para la producción de alimentos, aunque la productividad puede reducirse en estas tierras. Los impactos del uso la tierra seleccionados de cadenas de valor del sorgo dulce en las regiones tropicales y templadas se presentan en el Cuadro 17 y Cuadro 18.

Biodiversidad

La biodiversidad se define como la abundancia de las especies (plantas, animales y microorganismos) en un hábitat, esta es esencial para el funcionamiento de un ecosistema. La producción de biomasa para bioenergía puede tener efectos tanto positivos como negativos sobre la biodiversidad. Cuando se utiliza la tierra degradada, la diversidad de especies se podría mejorar. Sin embargo, las prácticas de los grandes monocultivos de los cultivos energéticos pueden ser perjudiciales para la biodiversidad local, especialmente a través de la pérdida de hábitat, la expansión de las especies invasoras y la contaminación debida a los fertilizantes y herbicidas.

A escala global, la biodiversidad es esencial para el funcionamiento de los ecosistemas que a su vez pueda garantizar diversos bancos de genes y los ciclos hidrológicos que permitan la agricultura. Sin embargo, en una escala de campo, los sistemas de cultivo más eficientes tienen una gran uniformidad y muy poca biodiversidad. El uso de la biomasa vegetal para proporcionar combustibles líquidos tiene el potencial de aumentar el impacto de la agricultura sobre la biodiversidad. El grado de pérdida de hábitat depende del tipo de uso de la tierra. El sorgo dulce, conocido por ser capaz de crecer en suelos marginales y tierras degradadas con la fertilización reducida hacen que su efecto en la biodiversidad sea restringido, siempre y cuando se cultive en pequeñas escalas y en rotación con otros cultivos (Elbehri *et al.* 2013).

Cuadro 17: Impacto del uso de suelo en sistemas a pequeña y gran escala de producción de bioetanol de 1a generación a partir de sorgo dulce en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)

Cultivo y conversión a gran escala	<p>Si las plantas de etanol en un sistema centralizado establecen plantaciones propias a gran escala en los países en desarrollo, esto puede afectar negativamente a la gente más pobre (acaparamiento de tierras). Hay un riesgo de desplazamiento y marginación de comunidades y pequeños propietarios locales.</p> <p>Hay un mayor riesgo de que el sorgo dulce se cultive como monocultivo con un impacto negativo del medio ambiente (por ejemplo, la fertilidad del suelo, la compactación del suelo, la deforestación) y socioeconómicos (servicios ecosistémicos).</p> <p>La competencia del uso del suelo puede ser alto, ya que las plantas más grandes suelen seleccionar las tierras agrícolas de buena calidad.</p> <p>La eficiencia en el uso del suelo (t/ha) y la eficiencia del proceso global de estos sistemas pueden ser más altos.</p>
Cultivo a pequeña escala y conversión a gran escala	<p>Las estructuras agrícolas existentes y tamaños de las granjas se pueden mantener. Debido a las estructuras más pequeñas de estos sistemas los servicios de biodiversidad y los ecosistemas pueden ser más grandes.</p> <p>La eficiencia del uso del suelo de estos sistemas puede ser más bajo que para el cultivo a gran escala, pero las instalaciones de etanol más grandes pueden ayudar a los agricultores más pequeños, por ejemplo, a través de entrenamiento o equipo agrícola.</p>
Cultivo y conversión a pequeña escala	<p>Las estructuras agrícolas y tamaños de las granjas se pueden mantener. Debido a las estructuras más pequeñas de estos sistemas de biodiversidad y servicios ecosistémicos pueden ser más grandes.</p> <p>La eficiencia en el uso del suelo de estos sistemas es generalmente más baja debido a la falta de recursos y conocimientos. Esto puede ser parcialmente compensada si existen buenas estructuras cooperativas.</p> <p>Sistemas de cultivo de sorgo dulce se pueden integrar fácilmente en las estructuras agrícolas en pequeña escala existentes sin afectar negativamente a los pequeños agricultores y campesinos (sin la apropiación de tierras). Los pobladores son responsables de la utilización del suelo y prácticas de producción de manera adecuada. Ellos no están obligados por las grandes empresas para adaptarse a sus reglas.</p>

Cuadro 18: Impacto del uso de suelo en sistemas a pequeña y gran escala de producción de bioetanol de 2a generación y biogás a partir de sorgo dulce en regiones templadas (Rutz et al. 2013).

Producción de Biogás	<p>El sorgo dulce es generalmente una buena alternativa a otros cultivos para la producción de biogás, especialmente para el maíz. Así que amplía las alternativas de cultivos y rotación de cultivos. Sin embargo, el aumento de la producción de cultivos energéticos para el biogás ha llevado en algunas zonas a un aumento de los precios de arrendamiento de tierras.</p>
Biocombustibles de 2a generación	<p>El sorgo dulce es un cultivo anual, por tanto, para producción cultivos leñosos o residuos para la producción de biocombustibles de 2ª generación puede ser preferido debido a que los impactos en el uso del suelo son generalmente más bajos para los cultivos leñosos.</p>

Aceite de Fusel	Mezcla de líquido venenoso, caustico y aceitoso proveniente de alcoholes de amilo, que se producen en los líquidos alcohólicos destilados incompletamente.
Aceite de Pirólisis	También conocido como bioaceite es una especie de alquitrán (una mezcla de hidrocarburos y carbono libre) y normalmente contiene niveles demasiado altos de oxígeno para ser un hidrocarburo.
Aldehído	Compuesto orgánico que contiene el grupo CHO al final de la cadena hidrocarbonada.
Anclaje	Condición de seguridad hacia algo
Anegamiento	Saturación del suelo con agua
Azúcar invertido	Mezcla de glucosa y fructosa. Se obtiene de la separación de la sacarosa, lo que da como resultado estos dos componentes. Comparado con su precursor, los azúcares invertidos son más dulces y sus productos tienden a retener más humedad y son menos propensos a la cristalización.
Azúcar morena	Azúcar tradicional no centrifugada. Es un producto concentrado de dátil, jugo de caña o savia de palma son la separación de melazas y cristales.
Azúcar reductor	Es un azúcar que sirve como agente reductor cuando los grupos funcionales aldehído o cetona se encuentran libres en su estructura. Algunos ejemplos son la glucosa, fructosa, gliceraldehidos, lactosa, arabinosa y maltosa.
Bagazo	Material lignocelulósico residual producto del prensado del cultivo.
Biodiversidad	Variabilidad total dentro y entre especies de organismos vivos y sus hábitats.
Bioetanol 1a generación	Bioetanol producido de azúcar, almidón y aceites vegetales.
Bioetanol 2a generación	Bioetanol producido a partir de biomasa (sustancias lignocelulósicas).

Celobiosa	Disacárido $C_{12}H_{22}O_{11}$ compuesto de dos moléculas de glucosa unidas por un enlace y obtenido a partir de la hidrólisis parcial de la celulosa.
Centrifugación	Proceso que envuelve el uso de la fuerza centrífuga para la sedimentación de mezclas utilizando una centrifuga.
Cetona	Compuesto que contiene un grupo carbonilo funcional puenteando dos grupos de átomos. La fórmula general para la cetona es $RC(=O)R'$ donde R y R' son los grupos arilo o alquilo.
Coagulación	Proceso que envuelve la transformación de un líquido a un gel o solido a través de una serie de reacciones químicas.
Compuestos Furánicos	Compuestos de Furano, un compuesto orgánico hetero cíclico, incoloro, flamable y altamente volátil. Es toxico y puede ser carcinogénico.
Cultivar	Planta o grupo de plantas seleccionadas por sus características deseables. Cultivar es una palabra general que incluye líneas, variedades e híbridos.
Desnitrificación	Proceso de reducción de nitrato (remoción) facilitado por microorganismos, donde se produce nitrógeno (N_2) a través de una serie de productos intermediarios de óxido de nitrógeno gaseoso.
Diversidad Genética	Variación genética presente en una población o especie.
Drenaje	Remoción natural o artificial del agua superficial y subsuperficial de un área.
Empacado	Compresión y empaclado del material para la formación de pacas.
Evapotranspiración	Proceso por el cual el agua es transferida del suelo a la atmosfera por la evaporación del agua y la transpiración de las plantas.
Fenotipo	Apariencia física o características bioquímicas de un organismo como resultado de la interacción de su genotipo con el ambiente.
Formación de espuma	Proceso de formación de burbujas y espuma en o sobre un líquido.
Fotoperiodo	Reacción fisiológica de los organismos a la longitud del día y de la noche. También puede ser definido como la respuesta de desarrollo de las plantas a longitudes relativas de los periodos de luz y oscuridad.

Fotosensitividad	Cantidad a la que un objeto reacciona al recibir fotones, especialmente de luz visible.
Genotipo	Conjunto total de genes de un organismo
Germoplasma	Conjunto de genotipos de que pueden ser conservados o usados, por ejemplo semillas, clones, polen, etc.
Glucanasa	Enzimas que rompen al glucano, un polisacárido compuesto de numerosas subunidades de glucosa. Debido a que realiza la hidrólisis de los enlaces glucosídicos, es considerada una hidrolasa.
Glucosidasa	Enzimas que catalizan la hidrólisis de los enlaces glicosídicos para la liberación de azúcares pequeños. Son enzimas extremadamente comunes, cuyo rol en la naturaleza incluye la degradación de biomasa como la celulosa y la hemicelulosa.
Grados Brix (°Bx)	Unidad de medida de sacarosa en un líquido.
Híbrido	Descendencia resultado del entrecruzamiento entre dos líneas parentales. Normalmente los híbridos no se pueden reproducir.
Hidrómetro Brix	Instrumento usado para medir la gravedad específica (o densidad relativa) de líquidos, que es la proporción de la densidad del líquido y la densidad del agua.
Ideotipo	Modelo biológico esperado del comportamiento o desempeño de un modo particular dentro de un ambiente determinado. Describe la apariencia ideal de una variedad.
Lignina	Substancia orgánica que actúa como aglutinante de las fibras de celulosa en la madera y cierto tipo de plantas, además agrega fuerza y rigidez a las paredes de la célula. La estructura química de la lignina está compuesta de un polímero complejo de fenilpropanoide, establecido en las paredes de las células vegetales tales como los vasos del xilema y el esclerénquima.
Lignocelulosa	Compuesta por polímeros de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) y un polímero aromático (lignina). Estos polímeros de carbohidratos contienen diferentes monosacáridos (azúcares de cinco y seis carbonos) los cuales están unidos de manera estrecha a la lignina.
Línea	Material que tiende a ser genéticamente idéntico
Maltodextrinas	Oligosacárido producido a partir del almidón en una hidrólisis parcial.

Mejoramiento	El arte y la ciencia de cambiar los genes de una planta y por consiguiente producir características deseables.
Monzón	Cambios temporales en la circulación atmosférica y la precipitación con el calentamiento asimétrico de la tierra y el océano.
Nematodo	Gusano no segmentado del phylum Nematoda, que tiene un cuerpo elongado y cilíndrico, gusano redondo.
Nervadura Central	Vena central de la hoja
Nitrificación	Oxidación biológica del amoníaco y el oxígeno a amonio, posteriormente el nitrito sufre una nueva oxidación y da como resultado la formación de nitratos.
Oligosacáridos	Un polímero sacárido que contiene un pequeño número (típicamente de dos a diez) de azúcares simples.
pH	El símbolo para el logaritmo de la inversa de la concentración de iones de hidrógeno en átomos gramo por litro, que se utiliza para expresar la acidez o alcalinidad de una solución en una escala de 0 a 14, donde menos del 7 representa la acidez, 7 neutralidad, y más de 7 .
Planta C4	Planta en donde el CO ₂ es arreglado en un compuesto que contiene cuatro carbonos antes de entrar al ciclo de Calvin de la fotosíntesis. Una planta C4 está mejor adaptada que una planta C3 en un ambiente donde se presentan altas temperaturas durante el día, intensa radiación solar, sequía o limitaciones de nitrógeno o CO ₂ .
Polisacáridos	Moléculas largas de carbohidratos conformadas por unidades de monosacáridos unidas por enlaces glicosídicos. Su estructura puede ir de lineal a altamente ramificada.
Radiación Activa	El rango espectral (longitud de onda) de la radiación solar abarca los rangos de 400 a 700 nanómetros, dentro de este rango los organismos fotosintéticos son capaces de utilizar la radiación en el proceso de fotosíntesis. Esta región espectral corresponde más o menos con el rango de la luz visible para el ojo.
Rasgo	(Genética) Características o atributos de un organismo que son expresadas por los genes y/o influenciadas por el ambiente.
Refractómetro	Aparato utilizado para medir la gravedad específica antes de la fermentación para determinar la cantidad de azúcares que pueden ser potencialmente convertidos en alcohol.

Sorbitol	Es un sustituto del azúcar que el ser cuerpo del ser humano metaboliza de manera lenta. Puede ser obtenido por la reducción de la glucosa.
Suelos Ácidos	Suelos con un valor de pH menor que 6.
Suelos alcalinos	Suelos con un valor de pH mayor que 8.
Suelos Salinos	Suelos no sódicos que contiene suficiente sal soluble para afectar de manera adversa el crecimiento de la mayoría de los con un límite inferior de la conductividad eléctrica del extracto saturado (ECe) de cuatro deciSiemens/metro (dS/m)
Taxa	Es un grupo de una o más poblaciones de organismos que los taxonomistas adjudican a ser una unidad.

Abreviaciones

%	: Por ciento	J	: Joule
°C	: Grado centígrado	K ₂ O	: Oxido de Potasio
°N	: Grados norte	kg	: Kilogramo
°S	: Grados sur	kJ	: Kilojoule
1a	: Primera	kWel	: Kilowatt Eléctrico
2a	: Segunda	l	: Litro
AD	: Anno Domini (después de Cristo)	m	: Metro
Al	: Aluminio	m ²	: Metro cuadrado
BC	: Antes de Cristo	m ³	: Metro cubico
BNI	: Inhibición Biológica de la Nitrificación	Mg	: Megagramo
CHP	: Calor y energía combinados	MJ	: Megajoule
cm	: Centímetro	ml	: Mililitro
CO ₂	: Dióxido de Carbono	mm	: Milímetro
CO	: Monóxido de Carbón	Mn	: Manganeso
Cu	: Cobre	N	: Nitrógeno
dS	: DeciSiemens	NaCl	: Cloruro de Sodio
Fe	: Hierro	NaOH	: Hidróxido de Sodio
g	: Gramo	NaSO ₄	: Sulfato de Sodio
GHG	: Gases de efecto invernadero	NH ₃	: Amonio
GJ	: Gigajoule	P	: Fosforo
h	: Hora	P ₂ O ₅	: Pentóxido de Fosforo
H	: Hora	RUE	: Eficiencia del uso de la radiación
H ₂	: Hidrogeno	t; ton	: Toneladas
H ₂ O ₂	: Peróxido de Hidrogeno	v	: Volumen
H ₂ S	: Sulfito de Hidrogeno	WUE	: Eficiencia del uso del agua
ha	: Hectáreas	Zn	: Zinc

Créditos de las Figuras

- Figura 4: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 5: Fred Miller, US Department of Agriculture - Agricultural Research Service
- Figura 6: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 8: ICRISAT, Patancheru 502324 Andhra Pradesh India
- Figura 8: Luciano Viana Cota, Embrapa, Brazil
- Figura 9: Joseph Krausz, Texas agricultural extension service, USA
- Figura 10: Embrapa, Caixa Postal 151 Rodovia MG-424, Km 45 34701-970 Sete Lagoas, MG BRAZIL
- Figura 12: Dave Jordan, MacDon Industries LLC
- Figura 14: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 15: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 16: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 17: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 19: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 26: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany
- Figura 27: Dominik Rutz, WIP Renewable Energies, Munich, Germany

Índice de Figuras

Figura 1: Estructuras botánicas de la planta de sorgo (Murty et al. 1994)	4
Figura 2: Diferentes variedades de semillas de sorgo dulce. Se puede observar la amplia variabilidad de formas y colores (Reddy et al. 2008)	5
Figura 3: Raíces de anclaje en sorgo dulce (©Braconnier)	5
Figura 4: Inflorescencia de Sorgo dulce (© izquierda, Braconnier, derecha, Rutz)	6
Figura 5: Diversidad en color y forma de panículas, lo cual muestra la enorme variación genética de las distintas especies de Sorghum (©Braconnier)	8
Figura 6: Campo de Mejoramiento para sorgo de grano en Sudáfrica (©Rutz)	8
Figura 7: Nervadura café en hoja de sorgo dulce (© Braconnier)	9
Figura 8: Calendario de Producción de Bioetanol en Brasil (© EMBRAPA)	14
Figura 9: Antracnosis de la hoja (© Viana Cota)	16
Figura 10: Cosechadora ajustada para la cosecha de sorgo dulce (© Embrapa).	31
Figura 11: Récolte manuelle du sorgho sucré double usage en Inde (© ICRISAT)	31
Figura 12: Sorgo energético cosechado como materia prima bioenergética celulósica (Fuente: © Jordan)	32
Figura 13: Procesos a los cuales se puede someter el sorgo energético y sus productos	33
Figura 14: FFVs en una feria comercial (Fuente: Rutz)	35
Figura 15: Primera molienda en el proceso de extracción del jugo del sorgo dulce (© Braconnier).	35
Figura 16: Bagazo resultante después de la extracción del jugo (© Braconnier)	35
Figura 17: Fermentadores de una planta productora de etanol utilizando caña de azúcar, Brasil (Fuente: Rutz)	36
Figura 18: Planta ABENGOA de producción de etanol a partir de granos en Salamanca, España (Fuente: © Rutz)	36
Figure 19: DDGS de una planta productora de etanol a partir de granos (Fuente: © Rutz)	36
Figura 20: Pasos de la conversión en la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja	39
Figura 21: Planta Agrícola de Producción de Biogás, Alemania (Fuente: © Rutz)	39
Figure 22: Comparación básica de los principios de los ciclos de vida del etanol de sorgo dulce y la gasolina (Braconnier and Reinhardt 2013)	44
Figure 23: Sistema descentralizado de producción de jarabe (Braconnier and Reinhardt 2013)	46
Figure 24: Sistema de Producción de Biogás (Braconnier and Reinhardt 2013)	47
Figura 25: Producción de etanol de segunda generación a partir de lignocelulosa de sorgo dulce en climas templados (Braconnier and Reinhardt 2013)	48

Índice de Cuadros

Cuadro 1:	Comparación entre caña de azúcar y sorgo dulce (Almodares y Hatamipour 2011))	12
Cuadro 2:	Enfermedades patogénicas que pueden atacar al cultivo de sorgo	17
Cuadro 3:	Plagas de Insectos que atacan al sorgo	22
Cuadro 4:	Géneros de nematodos fitoparásitos que pueden ser patogénicos en sorgo (Claflin 1983)	29
Cuadro 5:	Comportamiento de la disminución del contenido de azúcar en relación al retraso de la molienda (Reddy et al. 2008).	31
Cuadro 6:	Esquemmatización del proceso de combustión	41
Cuadro 7:	Impactos sobre las ganancias de sorgo dulce en los sistemas a grande y pequeña escala de la producción de bioetanol de 1ª generación (Rutz et al. 2013)	49
Cuadro 8:	Impactos sobre las ganancias de sorgo dulce en la producción de biogás y biocombustibles de 2ª generación en regiones templadas (Rutz et al. 2013)	49
Cuadro 9:	Impactos en la eficiencia de las cadenas de valor del sorgo dulce para la producción de bioetanol de 1ª generación a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	50
Cuadro 10:	Impactos en la eficiencia de la cadena de valor del sorgo dulce en la producción de biogás y biocombustibles de 2ª generación en regiones templadas (Rutz et al. 2013)	50
Cuadro 11:	Impacto en la inversión de sistemas de producción de bioetanol de 1a generación a base de sorgo dulce a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	51
Cuadro 12:	Impacto en la seguridad alimentaria y energética de los sistemas de producción de bioetanol de primera generación utilizando sorgo dulce en pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	53
Cuadro 13:	Impacto de los sistemas de producción de bioetanol de 1a generación de sorgo dulce a pequeña y gran escala sobre la creación de empleo, la salud y las condiciones laborales en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	54
Cuadro 14:	Impactos de la producción de biogás y biocombustibles de 2a generación de sorgo dulce en la creación de empleos, salud y condiciones de trabajo en regiones templadas (Rutz et al. 2013)	55
Cuadro 15:	Aceptación publica y de las partes interesadas en la producción de bioetanol de 1a generación de sorgo dulce en sistemas a pequeña y gran escala en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	56
Cuadro 16:	Aceptación pública y de las partes interesadas en la producción de biogás y bioetanol de 2a generación de sorgo dulce en sistemas a pequeña y gran escala en regiones templadas (Rutz et al. 2013)	56
Cuadro 17:	Impacto del uso de suelo en sistemas a pequeña y gran escala de producción de bioetanol de 1a generación a partir de sorgo dulce en regiones tropicales (Rutz et al. 2013)	60
Cuadro 18:	Impacto del uso de suelo en sistemas a pequeña y gran escala de producción de bioetanol de 2a generación y biogás a partir de sorgo dulce en regiones templadas (Rutz et al. 2013).)	60

Bibliografía

Abdulai AL, Kouressy M, Vaksman M, Asch F, Giese M, Holger B (2012) Latitude and date of sowing influences phenology of photoperiod-sensitive sorghums. *Journal of Agro Crop Science* 198(5):340-348. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2012.00523.x

Agrifuels (2009) Sweet Investment in Fuel and Food - <http://www.agrifuels.com.au/documents/SweetInvestmentinFuelandFood.pdf> (accessed: 05 October 2013)

Agropedia (2013) Botanical description of Sorghum: Root System - <http://agropedia.iitk.ac.in/content/botanical-description-sorghumroot-system> (accessed: 05 March 2013)

Ali ML, Rajewski JF, Baenziger PS, Gill KS, Eskridge KM, Dweikat I (2008) Assessment of genetic diversity and relationship among a collection of US sweet sorghum germplasm by SSR markers. *Molecular Breeding* 21(4):497-509. DOI: 10.1007/s11032-007-9149-z

Almodares A, Hadi MR (2009) Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research* 4(9):772-780

Almodares A, Hatamipour MS (2011) Planting sweet sorghum under hot and dry climatic condition for bioethanol production. *World Renewable Energy Congress 2011*, Sweden

Amosson S, Girase J, Bean B, Rooney W, Becker J (2011) Economic Analysis of Sweet Sorghum for Biofuels Production in the Texas High Plains - <http://amarillo.tamu.edu/files/2011/05/Sweet-Sorghum.pdf> (accessed: 10 July 2013)

Antonopoulou G, Gavala HN, Skiadas IV, Angelopoulos K, Lyberatos G (2008) Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresource Technology* 99(1):110-119. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.048

Arantes V, Saddler JN (2010) Access to cellulose limits the efficiency of enzymatic hydrolysis: the role of a morphogenesis. *Biotechnology for Biofuels* 3(1):4. DOI: 10.1186/1754-6834-3-4

Armstrong A, Baro J, Dartoy J, Groves A, Nikkonen J, Rickeard D, Thompson N, Larivé J (2002) Energy and greenhouse gas balance of biofuels for Europe - an update. concawe, report no 2/02, Brussels

Assar AHA, Uptmoor R, Abdelmula AA, Salih M, Ordon F, Friedt W (2005) Genetic Variation in Sorghum Germplasm from Sudan, ICRISAT and USA Assessed by Simple Sequence Repeats (SSRs). *Crop Science* 45(4):1636. DOI: 10.2135/cropsci2003.0383

Basavaraj G, Parthasarathy Rao P, Basu K, Reddy R, Kumar AA, Srinivasa Rao P, Reddy BVS (2012) Assessing Viability of Bio-ethanol Production from Sweet Sorghum. Working Paper Series no. 30, RP – Markets, Institutions and Policies, p. 20, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India

Basso LC, Basso TO, Rocha SN (2011) Ethanol production in Brazil: the industrial process and its impact on yeast fermentation - biofuel production-recent developments and prospects, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.). www.intechopen.com (accessed: 05 March 2013)

Bele PV (2007) Economics of on- farm Ethanol Production using Sweet Sorghum, Master Thesis - <http://digital.library.okstate.edu/etd/umi-okstate-2165.pdf> (accessed: 05 March 2013)

Betancur GJV, Pereira Jr.N (2010a). Sugar cane bagasse as feedstock for second generation ethanol production. Part I: Diluted acid pretreatment optimisation. *Electronic Journal of Biotechnology* 13(3). DOI:10.2225/vol13-issue3-fulltext-3

Betancur GJV, Pereira Jr.N (2010b). Sugar cane bagasse as feedstock for second generation ethanol production. Part II: Hemicellulose hydrolysate fermentability. *Electronic Journal of Biotechnology* 13(5). DOI: 10.2225/vol13-issue5-fulltext-8

Bitzer MJ, Fox JD (2000) AGR-123: Processing Sweet Sorghum for Syrup - <http://www.uky.edu/Ag/CDBREC/introsheets/swsorghumintro.pdf> (accessed: 05 March 2013)

Blade Energy Crops (2010) Managing high biomass sorghum as a dedicated energy crop - http://www.bladeenergy.com/Bladepdf/Blade_SorghumMgmtGuide2010.pdf (accessed: 05 March 2013)

Blümmel M, Rao PP (2006) Economic value of sorghum stover traded as fodder for urban and peri-urban dairy production in Hyderabad, India. *International Sorghum and Millets Newsletter* 47:97-100

BMU (2012) Biomass Ordinance (Biomasse V) (as amended as of 1 January 2012), Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany - http://www.bmu.de/english/renewable_energy/downloads/doc/5433.php (accessed: 10 July 2013)

Braconnier S, Gutjhard S, Trouche G, Reddy B, Rao S, Schaffert R, Parella R, Zaccharias A, Rettenmaier N, Reinhardt G, Monti A, Amaducci S, Marocco A, Snijman W, Terblanche H, Zavala-Garcia F, Janssen R, Rutz D (2011) Definition of new sorghum ideotypes to meet the increasing demand of biofuels: Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, 06-10 June 2011, Berlin, Germany, pp. 782-786. DOI: 10.5071/19thEUBCE2011-VP1.3.78

Cardwell KF (1989) Pathotypes of *Colletotrichum graminicola* and seed transmission of sorghum anthracnose. *Plant Disease* 73(3):255-257. DOI: 10.1094/PD-73-0255

Cassman KG, Peng S, Olk DC, Ladha JK, Reichardt W, Doberman A, Singh U (1998) Opportunities for increasing nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research* 56(1-2):7-39. DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00140-8

CFC-ICRISAT (2004) Alternative uses of sorghum and pearl millet in Asia: Proceedings of the expert meeting in ICRISAT, 1-4 July 2003, Andhra Pradesh, India. Common fund for commodities, Amsterdam

- Chagwiza C, Fraser G (2012) Economic evaluation of sweet sorghum in biofuel production as a multi-purpose crop: The case of Zambia – In: Janssen R, Rutz D (eds.) (2012) Bioenergy for sustainable development in Africa – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York. ISBN 978-94-007-2180-7. DOI 10.1007/978-94-007-2181-4
- Cherney J, Cherney D, Akin D, Axtell J (1991) Potential of brown-midrib, low-lignin mutants for improving forage quality. *Advances in Agronomy* 46:157-198
- Claflin L E (1984) Sorghum root and stalk rots, a critical review: Proceedings of the consultative group discussion on research needs and strategies for control of sorghum root and stalk rot diseases, 27 Nov - 2 Dec 1983, Bellagio, Italy
- Clayton WD (1961) Proposal to conserve the generic name *Sorghum* Moench (Gramineae) versus *Sorghum* Adans (Gramineae). *Taxon* 10: 242-243.
- Curt M, Fernandez J, Martinez M (1998) Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain. *Biomass and Bioenergy* 14(2):169-178. DOI: 10.1016/S0961-9534(97)10025-3
- Das D (2009) Advances in biohydrogen production processes: An approach towards commercialisation. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(17):7349-7357. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.013
- De Castro AM, de Albuquerque de Carvalho ML, de Leite SGF, Pereira Júnior N (2010) Cellulases from *Penicillium funiculosum*: production, properties and application to cellulose hydrolysis. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 37(2):151-158. DOI: 10.1007/s10295-009-0656-2
- Dercas N, Liakatas A (2007) Water and radiation effect on sweet sorghum productivity. *Water Resource Management* 21(9):1585-1600. DOI: 10.1007/s11269-006-9115-2
- Dhillon MK, Sharma HC, Reddy BVS, Singh R, Naresh JS (2006) Inheritance of resistance to sorghum shoot fly. *Crop Science* 46(3):1377-1383. DOI: 10.2135/cropsci2005.06-0123
- Dien BS, Sarath G, Pedersen JF, Sattler SE, Chen H, Funnell-Harris DL, Nichols NN, Cotta MA (2009) Improved sugar conversion and ethanol yield for forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) lines with reduced lignin contents. *Bioenergy Research* 2(3):153-164. DOI: 10.1007/s12155-009-9041-2
- Doggett H (1988) *Sorghum*, 2nd Ed, Longman Scientific & Technical, Harlow, UK
- Du Plessis J (2008) *Sorghum production*. Department of Agriculture, Republic of South Africa - http://www.daff.gov.za/docs/Infopaks/FieldCrops_Sorghum.pdf (accessed: 19 February 2013)
- Dweikat I (2012) Sweet sorghum is a drought-tolerant feedstock with the potential to produce more ethanol/acre than corn, University of Nebraska - <http://agronomy.unl.edu/sweetsorghum> (accessed: 05 March 2013)
- EC (2010) Report from the Commission on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids - <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0811:FIN:EN:PDF> (accessed: 05 April 2013)

- Eghball B, Maranville JW (1993) Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined water and nitrogen stresses. *Agronomy Journal* 85(1):147-152. DOI: 10.2134/agronj1993.00021962008500010027x
- Elbehri A, Segerstedt A, Liu P (2013) Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. FAO, Rome, Italy
- Erdei É, Pépó P, Boros N, Tóth S, Szabó B (2009) Morphological and biochemical indicators of drought tolerance in sweet sorghum (*Sorghum dochna* L.) *Cereal Research Communications* 37:157-160
- FAO (1994) Breeding and cultivation of sweet sorghum - <http://www.fao.org/docrep/t4470e/t4470e05.htm> (accessed: 05 October 2013)
- FAO (1995) Sorghum and millets in human nutrition. Food and Agriculture Organisation of the United Nations UNIPUB (distributor), Rome, Lanham, MD
- FAO (2007) Proceedings of the First FAO technical consultation on bioenergy and food security, 16-18 April 2007, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, Italy.
- Gosse G (1996) Sweet sorghum, a crop for industry and energy supply. AIR1 CT 92-0041. European Commission (DG XII), Brussels, Belgium
- Gosselink J (2002) Pathways to a more sustainable production of energy: sustainable hydrogen? A research objective for Shell. *International Journal of Hydrogen Energy* 27(11-12):1125-1129. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00092-7
- Gowda PSB, XU GW, Frederiksen RA, Magill CW (1995) DNA markers for downy mildew resistance genes in sorghum. *Genome* – 38(4):823-826. DOI:10.1139/g95-106
- Grassi G (1992) Biomass for energy, industry and environment: Proceedings of the International Conference on Biomass for Energy, Industry and Environment, April 1991, Athens, Greece, pp. 22-26. Elsevier Applied Science, London
- Gunnerman R, Farone W (1986) Process for preparing and using sweet sorghum in a fuel product. United States Patent, Patent number 4 613 339
- Hahn-Hägerdal B, Galbe M, Gorwa-Grauslund M, Lidén G, Zacchi G (2006) Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnology* 24(12):549-556. DOI: 10.1016/j.tibtech.2006.10.004
- Halford NG, Karp A (2011) Energy crops. Cambridge: Royal Society of Chemistry
- Hallenbeck PC (2009) Fermentative hydrogen production: Principles, progress, and prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(17):7379-7389. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.080
- Harlan JR, de Wet JMJ (1972) A simplified classification of cultivated sorghum. *Crop Science* 12:172-176.
- Harris HB and Sowell G (1970) Incidence of *Colletotrichum graminicola* on *Sorghum bicolor* introductions. *Plant Disease Reporter* 54:60-62

- Harris HB, Johnson BJ, Dobson JW and Luttrell ES (1964) Evaluation of anthracnose on grain sorghum. *Crop Science* 4:460-462
- Hawkes F (2002) Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation. *International Journal of Hydrogen Energy* 27(11-12):1339-1347. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00090-3
- Henri J (1864) Études et expériences sur le sorgho à sucre considéré aux points de vue botanique, agricole, chimique, physiologique et industriel. Paris Etienne Giraud, Libraire-editeur 20, rue saint-suplice
- Henrissat B (1994) Cellulases and their interaction with cellulose. *Cellulose* 1(3):169-196. DOI: 10.1007/BF00813506
- Hess DE, Bandyopadhyay R, Sissoko I (2001) Reactions of sorghum genotypes to leaf, panicle and grain anthracnose (*Colletotrichum graminicola*) under field conditions in Mali - In: Akintayo I, Sedgo J (eds) Towards sustainable sorghum production, utilisation, and commercialisation in West and Central Africa: Proceedings of a technical workshop of the West and Central Africa Sorghum Research Network. WCASRN/ROCARS, West and Central Africa Sorghum Research Network, Bamako, Mali
- Hiegl W, Rutz D, Janssen R (2011) European Project "Install+RES": Training Courses for Trainers and Installers of Biomass Systems in Buildings, Information material: Module Biomass - <http://creativecommons.org/licences/by-nc-sa/3.0/legalcode> (accessed: 10 July 2013)
- House LR (1985) A guide to sorghum breeding, second edition. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Human S, Trikoesoemaningtyas, Sihono, Sungkono (2010) Development of Sorghum Tolerant to Acid Soil Using Induced Mutation with Gamma Irradiation. *Atom Indonesia* 36(1):11-15
- IEA Task 39 (2013) International Energy agency - <http://demoplants.bioenergy2020.eu/> (accessed: 30 September 2013)
- Jacobsen SE, Wyman CE (2000) Cellulose and hemicellulose hydrolysis models for application to current and novel pretreatment processes. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 84-86(1-9):81-96. DOI: 10.1385/ABAB:84-86:1-9:81
- Janssen R, Rutz D, Braconnier S, Reddy B, Srinivas Rao P, Schaffert R, Parella R, Zacharias A, Rettenmaier N, Reinhardt G, Monti A, Amaducci S, Marocco A, Snijman W, Terblanche H, Zavala-Garcia F (2012) Sweet sorghum - an alternative energy crop (2010) Sweet Sorghum - an Alternative Energy Crop: Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3 - 7 May 2010, Lyon, France. DOI: 10.5071/18thEUBCE2010-OD4.2
- Janssen R, Rutz D, Helm P, Woods J, Diaz-Chavez R (2009) Bioenergy for Sustainable Development in Africa – Environmental and Social Aspects: Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June - 3 July 2009, Hamburg, Germany, pp. 2422-2430

- Janssen R, Turhollow AF, Rutz D, Mergner R (2013 in press) Production facilities for 2G biofuels in the US and the EU – current status and future perspectives. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*
- Kapdan IK, Kargi F (2006) Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology* 38(5):569-582. DOI: 10.1016/j.enzmitec.2005.09.015
- Khanal SK (2008) *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications*. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa
- Kumar AA, Reddy BVS, Ravinder RC, Blümmel M, Srinivasa Rao P, Ramaiah B, Sanjana RP (2010) Enhancing the harvest window for supply chain management of sweet sorghum for ethanol production. *Journal of SAT Agricultural Research* 8
- Laopaiboon L, Thanonkeo P, Jaisil P, Laopaiboon P (2007) Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 23(10):1497-1501. DOI: 10.1007/s11274-007-9383-x
- Lynd LR, Wemer PJ, Zyl WHV, Pretorius IS (2002). Microbial cellulose utilisation: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 66(4):739. DOI: 10.1128/MMBR.66.4.739.2002
- Maeda RN, Silva MMP, Santa Anna LMM, Pereira, JRN, 2010. Nitrogen source optimisation for cellulase production by *Penicillium funiculosum*, using a sequential experimental design methodology and the desirability function. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 161(1-8):411-422. DOI: 10.1007/s12010-009-8875-6
- Mantovani EC, Ribas PM, Guimaraes JB (2012) Mecanizacao – In: May A, Duares FOM, Filho IAP, Schaffert RE, Parrella (eds) *Sistema Embrapa de producao agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG*
- McCarry PL (1964) *Anaerobic waste treatment fundamentals, public works* - <http://seas.ucla.edu/stenstro/Anaerobic%20assignment.pdf> (accessed: 12 February 2013)
- Miri K, Rana DS (2012) Evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes for bio-mass, sugar and ethanol production under different levels of nitrogen. *The Indian Journal of Agricultural Sciences* 82(3):195-200
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilisation. *Agronomy Journal* 74(3):562-564. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400030037x
- Monteith JL (1993) Using tube solarimeters to measure radiation intercepted by crop canopies and to analyse stand growth. Delta-T Devices, Application Note: TSL-AN-4-1
- Morris BD, Richardson JW, Frosch BJ, Outlaw JL, Rooney WL (2009) Economic feasibility of ethanol production from sweet sorghum juice in Texas: The Southern Agricultural Economics Association Annual Meetings, 31 January – 3 February 2009, Atlanta, Georgia - <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/46852/2/Economic%20Feasibility%20of%20Sweet%20Sorghum%20Ethanol.pdf> (accessed: 06 July 2013)

- Murty DS, Tabo R, Ajayi O (1994) Sorghum hybrid seed production and management. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Muzaale F (2011) Uganda: Planned sweet sorghum project to create 250 jobs - The monitor - <http://allafrica.com/stories/201109130296.html> (accessed: 11 April 2011)
- Mwakasonda S, Farioli F (2012) Social Impacts of Biofuel Production in Africa – In: Jansen R, Rutz D (eds.) (2012) Bioenergy for sustainable development in Africa – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York. ISBN 978-94-007-2180-7. DOI 10.1007/978-94-007-2181-4
- Nimbkar N, Kolekar AJH, Rajvanshi A (2006) Syrup production technology from sweet sorghum - <http://www.nariphaltan.org/syrup.pdf> (accessed: 06 March 2013)
- Obilana AT (1985) Recurrent selection schemes in photosensitive sorghum sorghum-bicolor populations. *Zeitschrift Fuer Pflanzenzuechtung* 95(3):221-229. ISSN: 00443298
- Oliver AL, Pedersen JF, Grant RJ, Klopfenstein TJ (2005) Comparative effects of the sorghum -6 and -12 genes. *Crop Science* 45(6):2234-2239. DOI: 10.2135/cropsci2004.0644
- Pari L, Grassi G, Capaccioli S (2008) State of the art: Harvesting, storage and logistic of the sweet sorghum: Proceedings of the 16th European Biomass Conference & Exhibition 2-6 June 2008, Valencia, Spain, pp. 174-177
- Poletti A, Poletti L, Berna F (1996) Bioconversion of sorghum - biogas: Proceedings of the First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry April 1-3, Toulouse, France, pp. 111
- Qazi HA, Paranjpe S, Bhargava S (2012) Stem sugar accumulation in sweet sorghum – Activity and expression of sucrose metabolizing enzymes and sucrose transporters. *Journal of Plant Physiology* 169(6):605-613. DOI: 10.1016/j.jplph.2012.01.005
- Quintero J, Montoya M, Sánchez O, Giraldo O, Cardona C (2008) Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. *Energy* 33(3):385-399. DOI: 10.1016/j.energy.2007.10.001
- Ra K, Shiotsu F, Abe J, Morita S (2012) Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* 37: 330-334. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.12.047
- Rao Dayakar B, Ratnavathi CV, Karthikeyan K, Biswas PK, Rao SS, Vijay Kumar BS, Seetharama N (2004) Sweet sorghum cane for biofuel production: A SWOT analysis in Indian context. National Research Centre for Sorghum, Rajendranagar, Andhra Pradesh, India, pp. 20
- Reddy BVS, Ramesh S, Ashok Kumar A, Gowda CLL (2008) Sorghum improvement in the new millennium. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Reddy BVS, Ramesh S, Reddy PS (2005) Sweet Sorghum – A potential alternate raw material for bio-ethanol and bioenergy. <http://agropedia.iitk.ac.in/openaccess/sites/default/files/v1i1sweet.pdf> (accessed: 06 March 2013)

- Reddy R (2013) Sowing time and method for sweet sorghum, ICRISAT agropedia <http://icrisat.agropedia.in/node/3060> (accessed: 05 March 2013)
- Reed W, Geng S, Hills F J (1986) Energy input and output analysis of four field crops in California. *Journal of Agronomy and Crop Science* 157(2):99-104. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1986.tb00054.x
- Ritter KB, McIntyre CL, Godwin ID, Jordan DR, Chapman SC (2007) An assessment of the genetic relationship between sweet and grain sorghums, within *Sorghum bicolor* ssp. *bicolor* (L.) Moench, using AFLP markers. *Euphytica* 157(1-2):161-176. DOI: 10.1007/s10681-007-9408-4
- Röhricht C (2007) Zuckerhirse und Sudangras – Rohstoffpflanzen für Biogasanlagen - <http://media.repro-mayr.de/15/76815.pdf> (accessed: 06 March 2013)
- Rutz D, Janssen R (2012a) Socio-economic impacts of different scales of biofuel production in Africa – In: Janssen R, Rutz D (eds.) *Bioenergy for sustainable development in Africa*. – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York, ISBN 978-94-007-2180-7. DOI 10.1007/978-94-007-2181-4_25;
- Rutz D, Janssen R (2012b) Sweet sorghum as Energy Crop: A SWOT Analysis, Report of the Sweetfuel project, WIP Renewable Energies, Munich, Germany - http://www.sweetfuel-project.eu/publications/swot_analysis_deliverable_6_5 (accessed: 07 March 2012)
- Rutz D, Janssen R, Khawaja C (2013) Socio-economic impacts of sweet sorghum in temperate and tropical regions – in: Rutz D, Janssen R (eds) *Socio-economic Impacts of Bioenergy Production* – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York (in Press)
- Schaffert RE, Santos FG, Borgonovi RA, Silva JB (1980) Aprenda a plantar sorgo sacarina. *Agroquimica*, Sao Paulo 13:10-14
- Schmidhuber J (2007) Biofuels: An emerging threat to europe's food security? Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: A longer-term perspective. Policy paper 17/05/2007, Notre Europe
- Shi X, Song H, Wang C, Tang R, Huang Z, Gao T, Xie J (2010) Enhanced bio-hydrogen production from sweet sorghum stalk with alkalisation pretreatment by mixed anaerobic cultures. *International Journal of Energy Research* 34:662-672. DOI: 10.1002/er.1570
- Smith CW, Frederiksen R (2000) *Sorghum: Origin, history, technology and production*. Wiley, New York
- Srinivasa Rao P, Deshpande S, Blümmel M, Reddy BVS, Hash T (2012) Characterisation of brown midrib mutants of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench): ICRISAT-ILRI. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 6(1):71-75
- Srinivasa Rao P, Deshpande S, Prakasham RS and Reddy BVS (2010) Composition and characterisation of bmr sorghums - In: Srinivasa Rao, Prakasham RS and Deshpande S (eds) *Brown midrib sorghum - current status and potential as novel ligno-cellulosic feedstock of bioenergy*, pp. 9-36, Lap Lambert academic publishing GmbH and Co KG, Germany

Srinivasa Rao P, Kumar C (2013) Characterisation of improved sweet sorghum cultivars. Springer, New Delhi, New York

Srinivasa Rao P, Reddy BVS, Blümmel M, Chandraraj K, Subbarao GV, Sanjana Reddy P, Parthasarathy Rao P (2009) Sweet sorghum as a Biofuel feedstock: Can there be Food-Feed-Fuel Tradeoffs: 60th International Executive Council Meeting and 5th Asian Regional Conference of International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 6-11 December 2009, New Delhi, India

Stamatelatou K, Dravillas K, Lyberatus G (2004) a two-stage process for the anaerobic digestion of sludge generated during the production of bioethanol from sweet sorghum. Laboratory of Biochemical Engineering and Environmental Technology, Department of Chemical Engineering, University of Patras

Subbarao GV, Ito O, Sahrawat KL, Berry WL, Nakahara K, Ishikawa T, Watanabe T, Sue-naga K, Rondon M and Rao IM (2006) Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems – Challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25:303-335

Subbarao GV, Nakahara K, Hurtado MP, Ono H, Moreta DE, Salcedo AF, Yoshihashi AT, Ishikawa T, Ishitani M, Ohnishi-Kameyama M, Yoshida M, Rondon M, Rao IM, Lascano CE, Berry WL, Ito O (2009b) Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria pas-tures*: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 106(41):17302-17307. DOI:10.1073/pnas.0903694106

Subbarao GV, Zakir HAKM, Nakahara K, Ishikawa T, Yanbuaban M, Yoshihashi T, Ono H, Yoshida M, Hash CT, Upadhyaya H, Srinivasa Rao P, Reddy BVS, Ito O, Sahrawat KL (2009a) Biological nitrification inhibition (BNI) potential in sorghum: The proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI, UC Davis - <http://escholarship.org/uc/item/5tp8s9pj> (accessed: 06 March 2013)

Sundara KD, Marimuthu P (2012) Sweet sorghum stalks – An alternate agro-based raw material for paper making. Seshasayee Paper and Boards Ltd, Erode, 638007

Sweethanol (2011a) Diffusion of a sustainable EU model to produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralised plants - Early Manual, CETA, Published by Poligrafiche San Marco S.a.s., Italy - http://www.ceta.ts.it/Joomla/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=121 (accessed: 05 March 2013)

Sweethanol (2011b) Diffusion of a sustainable EU model to produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralised plants - Intersectorial Manual, CETA, Published by Poligrafiche San Marco S.a.s., Italy - http://esse-community.eu/wpcontent/uploads/2012/02/Sweethanol_Intersectorial_Manual.pdf; (accessed: 09 April 2013)

Tan KT, Lee KT, Mohamed AR (2008) Role of energy policy in renewable energy accomplishment: The case of second-generation bioethanol. *Energy Policy* 36(9):3360-3365. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.05.016

Tarpley L, Vietor DM (2007) Compartmentation of sucrose during radial transfer in mature sorghum culm. *BMC Plant Biology* 7(1):33. DOI: 10.1186/1471-2229-7-33

Teetes G, Pendleton BB (2013) Insect pests of sorghum - <http://sorghumipm.tamu.edu/>

pests/iptoc.htm (accessed: 06 March 2013)

Thomas MD, Sissoko I, Sacko M (1996) Development of leaf anthracnose and its effect on yield and grain weight of sorghum in West Africa. *Plant Disease* 80:151-153

TNAU Agritech Portal (2013) Agricultural crops - Cereals - Sorghum - http://agritech.tnau.ac.in/crop_protection/crop_prot_crop%20diseases_cereals_sorghum.html (accessed: 06 March 2013)

Tsago Y, Andargie M, Takele A (2013) In vitro screening for drought tolerance in different sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 9(3):72. ISSN 1997-0838

Turhollow AF, Webb EG, Downing ME (2010) Review of sorghum production practices: Applications for bioenergy - <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub22854.pdf> (accessed: 05 March 2013)

Uganda Investment Forum (2013) Project profile: Kayunga District Biogreen Investments East Africa Ltd. 11-12 April 2013, Kampala, Uganda - http://www.cbcbglobal.org/images/uploads/library/Sorghum_Energy_Plant_-_Kayunga_District.pdf (accessed: 11 April 2013)

Uptmoor R, Wenzel W, Friedt W, Donaldson G, Ayisi K, Ordon F (2003) Comparative analysis on the genetic relatedness of *Sorghum bicolor* accessions from Southern Africa by RAPDs, AFLPs and SSRs. *Theoretical and Applied Genetics* 106(7):1316-1325. DOI: 10.1007/s00122-003-1202-7

Utria BE (2004) Ethanol and gelfuel: clean renewable cooking fuels for poverty alleviation in Africa. Africa Energy Group (AFTEG), The World Bank, 1818 H Street NW, Washington DC 20433, USA

Vaksmann M, Traore SB, Niangado O (1996) Photoperiodism in African sorghum. *Agriculture et Developpement* 9:13-18.

Vanderlip R (1998) Grain sorghum production handbook: Growth and development of the sorghum plant, Kansas State University, Kansas, USA - <http://www.ksre.ksu.edu/bookstore/pubs/c687.pdf> (accessed: 04 March 2013)

Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, Gatsis T (2011) Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Research* 120(1):38-46. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.08.011

Vecchiet A (2010) Advantages of sweet sorghum for bioethanol production – ESSE Community - <http://esse-community.eu/articles/advantages-of-sweet-sorghum-for-bioethanolproduction-2/> (accessed: 11 April 2013)

Vermerris W, Saballos A, Ejeta G, Mosier N S, Ladisch M R, Carpita N C (2007) Molecular breeding to enhance ethanol production from corn and sorghum stover. *Crop Science* 47(3):143-153. DOI:10.2135/cropsci2007.04.0013IPBS

Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000) IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry - Summary for Policymakers. - Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 20. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0 (accessed: 05 April 2013)

- WCED (1987) Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future - <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm> (accessed: 10 June 2013)
- WHO (2013) Indoor air pollution and health. Fact sheet no 292 of the World Health Organisation - <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/en/> (accessed: 10 July 2013)
- Wood TM, Garica-Campayo V (1990) Enzymology of cellulose degradation. *Biodegradation* 1(2-3):147-161. DOI: 10.1007/BF00058833
- Worley J, Vaughan D, Cundiff J (1992) Energy analysis of ethanol production from sweet sorghum. *Bioresource Technology* 40(3):263-273. DOI: 10.1016/0960-8524(92)90153-O
- Wortmann C, Ferguson R, Lyon D (2008) Sweet sorghum as a biofuel crop in Nebraska. Paper presented at the 2008 Joint Annual Meeting, Celebrating the International Year of Planet Earth, 5-9 October 2008, Houston, Texas - <http://crops.confex.com/crops/2008am/techprogram/P44581.HTM> (accessed: 10 July 2013)
- Xie T, Su P, Shan L, Ma J (2012) Yield, quality and irrigation water use efficiency of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench] under different land types in arid regions. *Australian Journal of Crop Science* 6(1):10-16
- Zhang YHP, Lynd LR (2004). Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: noncomplexed cellulase systems. *Biotechnology and Bioengineering* 88(7):797-824. DOI: 10.1002/bit.20282
- Zheng LY, Guo XS, He B, Sun LJ, Peng Y, Dong SS, Liu TF, Jiang S, Ramachandran S, Liu CM, Jing HC (2011) Genome-wide patterns of genetic variation in sweet and grain sorghum (*Sorghum bicolor*). *Genome biology* 12(11):R114. DOI: 10.1186/gb-2011-12-11-r114

