

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA VARIEDAD DE SORGO DULCE [*Sorghum
bicolor* (L.) MOENCH] “ROGER” EN LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL BAJO
DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRESENTA

IOSVANY LÓPEZ SANDIN

Escobedo, N.L.

Julio de 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA VARIEDAD DE SORGO DULCE [*Sorghum
bicolor* (L.) MOENCH] “ROGER” EN LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL BAJO
DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRESENTA

IOSVANY LÓPEZ SANDIN

Escobedo, N.L.

Julio de 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LA VARIEDAD DE SORGO DULCE [*Sorghum
bicolor* (L.) MOENCH] “ROGER” EN LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL BAJO
DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRESENTA

IOSVANY LÓPEZ SANDIN

Escobedo, N.L.

Julio de 2020

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL
COMITÉ PARTICULAR COMO REQUISITO PARA
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
COMITÉ PARTICULAR



Ph. D. Francisco Zavala García
Director de Tesis



Dra. Juanita Guadalupe Gutiérrez Soto
Co-Director



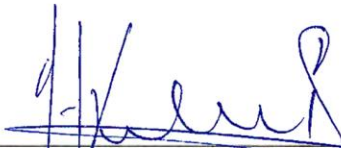
Dra. Adriana Gutiérrez Díez
Asesor



Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena
Asesor



Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera
Asesor



Ph. D. Juan Antonio Vidales Contreras
Sub Director de Posgrado e Investigación

DEDICATORIA

A mis abuelos:

Por su apoyo, enseñanzas, consejos y considerable paciencia durante la difícil guía en el camino correcto de la vida.

A mis padres:

El agradecimiento eterno por darme la vida e inculcarme sus firmes principios.

A mis hijos:

Por su amor, comprensión y apoyo durante esta etapa de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACYT** por proporcionarme la base de sustento económico que cubrió mis estudios de doctorado (636962).

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** y a la **Facultad de Agronomía** por permitir la realización de mis estudios de doctorado y darme la oportunidad de utilizar sus instalaciones y recursos para lograr el cumplimiento de los objetivos de mi proyecto de investigación.

A mi director de tesis **PhD. Francisco Zavala García**, mis más sinceros agradecimientos por darme el privilegio de su asesoramiento incondicional, enseñanzas, sabios consejos, amistad y apoyo durante estos años de formación como Doctor en Ciencias.

A mi co-directora de tesis **Dra. Guadalupe Gutiérrez Soto**, por su apoyo incondicional, sus sabias aclaraciones y paciencia durante este periodo de formación.

A mis asesores la **Dra. Adriana Gutiérrez Díez**, **Dr. Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena** y la **Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera**, por sus aportaciones en mi formación académica.

Al **Dr. Carlos E. Hernández Luna** por su apoyo incondicional y facilitarme el acceso a las instalaciones y recursos del Laboratorio de Enzimología de la Facultad de Ciencias Biológicas.

A mis maestros por brindarme sus conocimientos durante mi formación, en particular al **Dr. Humberto Rodríguez Fuente, PhD. Rigoberto Vázquez Alvarado y PhD. Emilio Olivares Sáenz.**

A los técnicos de campo **Javier, Jerónimo y Ramiro** por su apoyo durante el trabajo de campo, así como a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de esta investigación.

A TODOS MIS MÁS SINCEROS AGRADECIMIENTOS...

RESUMEN

La continua disminución de las reservas de combustibles fósiles y su impacto sobre el medio ambiente, aceleran la búsqueda de fuentes de energía alterna; en este contexto los biocombustibles proporcionan un sustituto viable, que contribuye a la reducción de las emisiones contaminantes a la atmósfera y a elevar la eficiencia de los combustibles convencionales. Entre las materias primas con potencial energético se destacan las de origen vegetal como el sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], una planta C₄ de ciclo corto con alta capacidad de adaptación a diversas condiciones de producción (clima, propiedades físico-químicas del suelo, escasez de agua, etc.), que puede ser sembrada en áreas marginales y de acumular altas concentraciones de azúcares fermentables en el tallo; además de producir una cantidad significativa de biomasa y grano (panícula).

Las características agronómicas del sorgo dulce lo convierten en un cultivo promisorio en la producción de bioetanol. Sin embargo, debe considerarse el componente energético a partir del balance de energía que identifique las labores o equipos agrícolas con alto gasto energético y, por consiguiente, llevar a cabo acciones o un plan de medidas que contribuya a reducir su consumo. En la producción del cultivo se requiere de una fuente externa y gratuita de energía que proviene del sol y otra

compuesta de fuentes transformadas, como las obtenidas a partir de hidrocarburos y del trabajo humano. Por lo tanto, es importante disminuir los consumos de energía provenientes de fuentes no renovables y aumentar la productividad del cultivo con el fin de mejorar la eficiencia energética del proceso.

Ante la situación energética y ambiental del mundo las ventajas que ofrecen las fuentes de energía renovables, pudieran ser un sólido argumento en la sustitución paulatina de los combustibles de origen fósil. Por consiguiente, en la consolidación de estas fuentes, en específico del bioetanol, son importantes investigaciones que generen información para obtener su máximo potencial; así como, realizar mejoras genéticas del material vegetal y modificaciones en los procesos de producción con la finalidad de incrementar la eficiencia y perfeccionar de las técnicas actuales.

Con base en lo anterior y específicamente a la variedad de sorgo dulce ROGER, es escasa información relacionada con rasgos agronómicos asociados con la producción de bioetanol como rendimiento de biomasa, jugo y sus contenidos de azúcares; además de factores que influyen en la eficiencia energética del proceso de producción de la variedad y en la cinética de conversión del jugo a bioetanol. Por lo tanto, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar el potencial de la variedad de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ROGER en la obtención de bioetanol de primera generación bajo diferentes sistemas de producción (SP).

Los SP fueron evaluados en un diseño de bloques completos al azar con arreglos en parcelas divididas y tres repeticiones; éstos consistieron en la combinación de diferentes métodos de labranza (L) y tipos de fertilizantes (F), donde: L1= labranza mínima (desbroce y rastra); L2= labranza tradicional (desbroce, arado y rastra); L3= arado tradicional con penetración profunda (desbroce, arado de subsuelo, arado y rastra); F1= fertilizante orgánico; F2= fertilizante inorgánico; y F3= sin fertilizante.

Para evaluar el efecto del SP en la obtención de bioetanol la investigación se dividió en tres etapas: a) en la primera etapa se determinó el SP de la variedad de sorgo dulce con mayor aportación de energía por hectárea; para lo cual fue realizado el balance de energía del proceso de producción del cultivo, identificando los índices energéticos asociados con su productividad a partir de la entrada de energía al proceso y del poder calorífico de la biomasa seca obtenida (espiga, hoja, tallo); b) en la segunda etapa se realizó un estudio de la dinámica de producción de biomasa y azúcares con el objetivo de definir la etapa fenológica de la planta con mejores rasgos agronómicos asociados a la obtención de bioetanol; c) en la tercera etapa se llevó a cabo la producción de bioetanol a partir del jugo del tallo, considerando el manejo postcosecha y la cinética de fermentación del jugo, con el objetivo de establecer la cinética de producción de bioetanol.

Los resultados de la primera etapa indicaron que la variedad puede ser cultivada en zonas semiáridas con altos rendimientos agronómicos, principalmente bajo L3 y F1. La producción de biomasa fresca de la planta (RBF), rendimiento de jugo (RJV) y grados

Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) con L3 fueron de $51.66 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, $20,783.12 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ y 16.04 , respectivamente. El RBF y RJV con F1 fue de $50.77 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $22,529.59 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente. Sin embargo, para $^{\circ}\text{Bx}$ la F1 y la F2 fueron estadísticamente iguales ($P>0.05$), siendo el mayor valor numérico para F2 (15.29%). Por otra parte, el mayor valor de energía neta se obtuvo en L3 y F1 con valores de $337,239.68 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $347,568.46 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente.

En la segunda etapa los resultados revelaron que la producción de azúcar y biomasa seca dependen de la etapa fenológica de la planta y de las dimensiones del tallo. Así, la mayor concentración de azúcar ($527.46 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ PS}$) y el mayor valor de rendimiento de biomasa seca de la planta ($19.01 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) se obtuvieron en la madurez fisiológica del cultivo; aunque, el mayor peso de jugo ($119.48 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$) se consiguió en la etapa de llenado del grano.

Los resultados de la tercera etapa indican que la obtención de bioetanol está asociada con el SP para lograr el máximo rendimiento, siendo la combinación de L3 con F1 la de mayor valor ($2.12 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$); resultado que depende de las pérdidas de jugo y azúcar durante el manejo postcosecha (trasporte, almacenamiento y molienda) así como, de la baja eficiencia del proceso de fermentación.

SUMMARY

The continuous decrease in fossil fuel reserves and the impact on the environment, accelerate the search for alternative energy sources. In this context, biofuels provide a viable substitute that contributes to the reduction of polluting emissions into the atmosphere and increases the efficiency of conventional fuels. Among the biomass materials with energy potential, those of plant origin stand out, such as sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], a short-cycle C₄ plant with high capacity to adapt to various production conditions (climate, physical-chemical properties of the soil, water shortage, etc.), that can be sown in marginal areas and accumulating high concentrations of fermentable sugars in the stem; as well as producing a significant amount of biomass and grain (panicle).

The sweet sorghum agronomic characteristics make it a promising crop in bioethanol production. However, the energy component must be considered based on the energy balance that identifies agricultural work or equipment with high energy consumption and, therefore, carrying out actions or a plan of measures that contributes to reduce its consumption. The crop production requires an external and free source of energy that comes from the sun and another composed of transformed sources, such as those obtained from hydrocarbons and human labor. Therefore, it is important to decrease energy consumptions from non-renewable sources and increase crop productivity in order to improve the process energy efficiency.

Given the energy and environmental situation in the world, the advantages offered by renewable energy sources could be a solid argument in the gradual replacement of fossil fuels. Therefore, in the consolidation of these sources, specifically of the bioethanol, they are important investigations that generate enough information to obtain their maximum potential; thus, genetic improvements of plant materials and modifications in production processes are carried out in order to increase efficiency and improve current techniques.

Based on the above and specifically on the ROGER sweet sorghum variety, there is little information related to agronomic traits associated with bioethanol production such as biomass yield, juice and its sugar content; in addition to factors that influence the energy efficiency of the variety's production process and the kinetics of converting the juice to bioethanol. Therefore, the objective of this work is to evaluate the potential of the sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ROGER variety in obtaining first generation bioethanol under different production systems (SP).

The SP were evaluated in a randomized complete block design with arrangements in divided plots and three replications; these consisted of the combination of different tillage methods (L) and fertilizer types (F), where: L1= minimum tillage (clearing and dredging); L2= traditional tillage (clearing, plowing and harrowing); L3= traditional plow with plow floor breakage (clearing, subsoil plow, plow and harrow); F1= organic fertilizer; F2= inorganic fertilizer; and F3= without fertilizer.

For evaluate the SP effect on obtaining bioethanol, the research was divided into three stages: in the first stage, the SP of the sweet sorghum variety with the highest energy contribution per hectare was determined; for this, the crop energy balance production process was carried out, identifying the energy indices associated with its productivity from the input of energy to the process and the calorific value of the dry biomass obtained (spike, leaf, stem). In the second stage, a study of the biomass and sugar production dynamics was carried out with the aim of defining the plant phenological stage with the best agronomic features associated with obtaining bioethanol. In the third stage, the production of bioethanol from the stem juice was carried out, considering the post-harvest handling and the kinetics of juice fermentation, with the aim of establishing the kinetics of bioethanol production.

The results of the first stage indicated that the variety can be cultivated in semi-arid areas with high agronomic yields, mainly under L3 and F1. The plant fresh biomass yield (RBF), juice yield (RJV) and Brix degrees ($^{\circ}\text{Bx}$) with L3 were $51.66 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, $20,783.12 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ and 16.04 , respectively. The RBF and RJV with F1 was $50.77 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $22,529.59 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectively. However, for $^{\circ}\text{Bx}$ the F1 and F2 were statistically the same ($P>0.05$), being the highest numerical value for F2 (15.29). On the other hand, the highest value of net energy was obtained in L3 and F1 with values of $337,239.68 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $347,568.46 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectively.

In the second stage, the results revealed that the sugar and dry biomass production depend on the plant phenological stage and of the stem dimensions. Thus, the highest sugar concentration ($527.46 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ PS) and the highest yield value of plant dry biomass

(19.01 t·ha⁻¹) were obtained in the physiological maturity of the crop. Although, the highest juice weight (119.48 g·plant⁻¹) was achieved in the grain filling stage.

The results of the third stage indicate that obtaining bioethanol is associated with SP to achieve maximum yield, with the combination of L3 with F1 being the of one with the highest value (2.12 m³·ha⁻¹); result that depends on the losses of juice and sugar during post-harvest handling (transport, storage and milling) as well as the low efficiency of the fermentation process.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Hipótesis de la Investigación.....	5
1.3 Objetivo General	5
1.3.1 Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2: BALANCE DE ENERGÍA EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE SORGO DULCE [<i>Sorghum bicolor</i> (L.) MOENCH] DESTINADO A LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL	7
2.1 Resumen	7
2.2 Introducción.....	8
2.3 Materiales y Métodos.....	11
2.3.1 Descripción del Sitio.....	11
2.3.2 Material Vegetal.....	12
2.3.3 Establecimiento y Diseño de Experimentos.....	12

2.3.4	Parámetros Agronómicos.....	13
2.3.5	Labores Agrícolas.....	13
2.3.6	Balance de Energía	14
2.3.6.1	Energía en las labores agrícolas mecanizadas	14
2.3.6.2	Índices energéticos	18
2.3.7	Análisis Estadístico	19
2.4	Resultados y Discusión.....	20
2.4.1	Parámetros Agronómicos.....	20
2.4.2	Balance de Energía	22
2.4.2.1	Energía en el trabajo agrícola mecanizado	22
2.4.2.2	Índices de energía	24
2.5	Conclusiones.....	26
CAPÍTULO 3: DINÁMICA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y AZÚCAR EN LA		
VARIEDAD DE SORGO DULCE ROGER		
3.1	Resumen	27
3.2	Introducción	28
3.3	Materiales y Métodos	30
3.3.1	Descripción del Sitio de Estudio	30
3.3.2	Material Vegetal.....	30
3.3.3	Establecimiento y Diseño Experimental	30
3.3.4	Registro de Datos.....	32
3.3.5	Parámetros Agronómicos por Entrenudos.....	33
3.3.6	Biomasa.....	34

3.3.7	Dinámica de Producción de Jugo y Azúcar en el Tallo.....	34
3.3.8	Análisis Estadístico.....	35
3.4	Resultado y Discusión.....	36
3.4.1	Parámetros Agronómicos por Entrenudos.....	36
3.4.2	Distribución y Acumulación de Azúcar en los Entrenudos.....	37
3.4.3	Longitud y Diámetro de Entrenudo	39
3.4.4	Biomasa.....	41
3.4.5	Dinámica de Producción de Jugo y Azúcar	43
3.5	Conclusiones.....	48
CAPÍTULO 4: RENDIMIENTO DE BIOETANOL DEL JUGO DE LA VARIEDAD DE SORGO DULCE ROGER.....		49
4.1	Resumen	49
4.2	Introducción	50
4.3	Materiales y Métodos.....	52
4.3.1	Material Vegetal	52
4.3.2	Obtención del Jugo	53
4.3.3	Preparación de Inoculo	54
4.3.5	Producción Teórica de Bioetanol	57
4.3.6	Análisis Estadístico	58
4.4	Resultado y Discusión.	58
4.4.1	Peso Fresco de Tallo, Rendimiento de Tallo Fresco, Contenido de Humedad del Bagazo y Eficiencia de Extracción de Jugo.....	58
4.4.2	Peso de Jugo, Volumen de Jugo y Grados Brix.....	60

4.4.3 Grados Brix en Función del Tiempo Transcurrido después de la Extracción del Jugo.....	63
4.4.4 pH en Función del Tiempo de Fermentación	64
4.4.5 Grados Brix y Azúcares Reductores en Función del Tiempo de Fermentación.....	65
4.4.6 Producción de Biomasa, Concentración y Rendimiento de Etanol del Jugo en Función del Tiempo de Fermentación.....	67
4.4.7 Rendimiento Teórico de Bioetanol	70
4.5 Conclusiones	70
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURO TRABAJO	72
5.1 Conclusiones	72
5.2 Recomendaciones para futuros trabajos	73
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	75
CAPÍTULO 7. ANEXOS	97
Apéndice 1.....	97
Apéndice 2.....	110
Apéndice 3.....	126

ÍNDICE DE CUADROS

	PÁGINA
Cuadro 2.1. Equivalentes energéticos.....	15
Cuadro 2.2. Cuadrados medios para el análisis de varianza de los parámetros agronómicos.....	20
Cuadro 2.3. Comportamiento agronómico del sorgo dulce por tratamiento de labranza (L) y de fertilización (F).	21
Cuadro 2.4. Gasto energético de las labores agrícolas mecanizadas en el sorgo dulce.....	23
Cuadro 2.5. Análisis de varianza en los índices de energía.	24
Cuadro 2.6. Índices de energía en los sistemas de producción.	25
Cuadro 3.1. Acomodo experimental y tratamientos establecidos en el estudio.	32
Cuadro 3.3. Correlación de Pearson para los parámetros agronómicos medidos por entrenado.	39

Cuadro 3.4. Cuadrados medios del análisis de varianza para la producción de biomasa seca, jugo y azúcar del tallo en las etapas fenológica de la planta y en los sistemas de producción.....	44
Cuadro 3.5. Comparación de medias para la producción de biomasa seca, jugo y azúcar del tallo en las etapas fenológica de la planta y en los sistemas de producción.	45
Cuadro 4.1. Composición y especificaciones de los tratamientos agronómicos.	53
Cuadro 4.2. Comparación de medias para el peso fresco del tallo, el contenido de humedad del bagazo y la eficiencia de extracción del jugo.....	59
Cuadro 4.3. Coeficiente de correlación y probabilidad entre los parámetros de obtención del jugo.....	59
Cuadro 4.4. Comparación de medias para peso de jugo del tallo, volumen de jugo del tallo y sólidos solubles totales por tratamiento de producción.....	61
Cuadro 4.5. Coeficiente de correlación y probabilidad entre los parámetros evaluados en la obtención de etanol.	67
Cuadro 4.6. Eficiencia de la fermentación, productividad volumétrica de etanol y rendimiento de etanol.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 2.1. Diagrama de bloques de la producción de materia prima de sorgo dulce (primera etapa) y sus respectivas entradas y salidas de energía del sistema. **10**

Figura 3.1. Etapas fenológicas (EF) evaluadas en la variedad de sorgo dulce ROGER: (a) el 50% de las plantas por tratamiento se encontraban en alguna fase de la floración, (b) la floración y la polinización estaban completas y comenzaba el llenado del grano, (c) los granos presentaban masa dura, (d) el cultivo se encontraba en el estado de madurez fisiológica. **33**

Figura 3.2. Evolución de la concentración de sólidos solubles totales o grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) por entrenudos (IN) en las etapas fenológicas (EF) de la planta: (a, b, c) distribución entre IN; (d) acumulación por IN. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P>0.05$). **38**

Figura 3.3. Evolución de longitud de entrenudo (IL) por etapa fenológica (EF) de la planta. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P>0.05$)..... **40**

Figura 3.4. Comportamiento del diámetro por entrenudo (ID) de la planta. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P > 0.05$).....**41**

Figura 4.1. Diagrama del proceso convencional para la obtención de bioetanol de primera generación de sorgo dulce. **51**

Figura 4.2. Comportamiento del pH del medio. **, $P < 0.01$. *, $P \leq 0.05$ **65**

Figura 4.3. Perfil de fermentación del jugo. a) °Bx= grados Brix o contenido de sólidos solubles totales; b) RS= azúcares reductores; c) PB= producción de biomasa; d) CEJ= concentración de etanol del jugo p/v; (a). **, $P < 0.01$. *, $P \leq 0.05$ **66**

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los combustibles de origen fósil actualmente son la principal fuente de energía primaria del mundo y su constante uso ha generado considerables volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes; lo cual ha repercutido de forma negativa sobre el medio ambiente y en el bienestar de los seres vivos (Nabavi *et al.*, 2016). Las amenazas del cambio climático relacionado con el incremento de la demanda energética (aumento de la población y del nivel vida); así como el alza de los precios de extracción del petróleo, han impulsado la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean renovables y amigables con el medio ambiente, siendo los biocombustibles los más prometedores. Lo anterior asociado a la significativa reducción (hasta un 54%) de las emisiones de GEI con respecto a los derivados del petróleo (Olukoya *et al.*, 2015; Adler *et al.*, 2018). En este sentido, la producción de biocombustibles se enfrenta a cuatro grandes desafíos: (1) la materia prima no debe competir con la producción de alimentos; (2) debe tener un balance neutro de emisiones contaminantes (CO₂); (3) su producción debe ser continua asegurando el abastecimiento de las instalaciones industriales (plantas extractoras,

biorrefinerías, fermentadores); y (4) los métodos de extracción deben ser rentables desde el punto de vista energético y económico para competir a largo plazo con el precio de otras fuentes de energía no renovables (Leyva y de Gauna, 2011).

La bioenergía es la fuente de energía más utilizada por la mayoría de los habitantes que viven en situación de extrema pobreza, principalmente para preparar sus alimentos. Sin embargo, el continuo avance tecnológico ha permitido el desarrollo de tecnologías de conversión de la biomasa más eficientes que hacen posible obtener biocombustibles en forma sólida, líquida y gaseosa; aunque la mayoría de estos logros aún no se han implementado en instalaciones comerciales (Zegarra, 2009; Zabed *et al.*, 2017).

Los biocombustibles líquidos (bioetanol y biodiesel) se usan como mezclas o sustitutivos de la gasolina y el diésel, empleados principalmente en el transporte y en la industria; y pueden clasificarse de acuerdo con el origen (materia prima) y tecnología empleada para su obtención como de primera, segunda, tercera y cuarta generación, ésta última se encuentra en fase de desarrollo (Leyva y de Gauna, 2011). Según Zabed *et al.* (2017) los recursos de biomasa utilizados en la producción de bioetanol se pueden clasificar en términos generales en azúcares, almidón y biomasa lignocelulósica, donde la conversión de biomasa en etanol varía considerablemente según la naturaleza de la materia prima, debido principalmente a la variación en la composición bioquímica.

El bioetanol (primera generación) es un producto que deriva de la fermentación de los azúcares contenidos en cultivos agrícolas (con alto contenido de sacarosa) como la caña de azúcar, la remolacha y el sorgo dulce o a partir del almidón contenido en el grano de maíz, trigo, cebada, tubérculos (como la patata) y raíces (como la yuca); cultivos destinados a la alimentación, por lo que su uso como material energético genera una polémica de seguridad alimentaria. Sin embargo, el sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] presenta características agronómicas que le permiten el suministro de materia prima para la producción de biocombustibles sin afectar la alimentación (Dar *et al.*, 2018), ya que es considerado el quinto cultivo de cereal en importancia del mundo y el sustento alimenticio de millones de personas, principalmente en países en vías de desarrollado (Mar *et al.*, 2019).

El sorgo dulce es una planta C₄ de ciclo corto que puede ser cultivada en disímiles condiciones agroclimáticas con bajos requerimientos de insumos agrícolas y agua; logrando alta producción de biomasa y acumulación de azúcares fermentables en el parénquima del tallo (Shukla *et al.*, 2017; Mathur *et al.*, 2017). Históricamente el sorgo ha sido utilizado en la producción de jarabe y melaza, pero su potencial bioenergético lo convierte en una materia prima viable para la fabricación de bioetanol y productos químicos (Ou *et al.*, 2016; Pabendon *et al.*, 2017).

Los rendimientos agronómicos del sorgo dulce se relacionan con la variedad y las condiciones de cultivo; consolidando una fuerte línea de investigación dirigida a determinar los factores que pueden afectar la productividad de los rasgos agronómicos asociados con la obtención de bioetanol (Disasa *et al.*, 2016). De ahí, la importancia

del estudio del proceso de producción del cultivo para identificar (entre otros factores) las mejores condiciones de desarrollo de la planta en términos energético y productivo, considerando actividades agrícolas como la preparación de suelos (Adimassu *et al.*, 2019) y la fertilización (Thivierge *et al.*, 2015) por su influencia en el desarrollo del cultivo, en los consumos de energía del sistema (Ding *et al.*, 2017), y la definición del momento óptimo de su cosecha (Pabendon *et al.*, 2017). Aunque esto no estaría completo sin el estudio de la cinética de fermentación que define la producción final de bioetanol (Phukoetphim *et al.*, 2019).

Por tal motivo, la productividad de etanol varía entre genotipos de sorgo dulce, debido a sus características como la cantidad de jugo que pueden retener en sus tallos, y la concentración de azúcares, que pueden influir en el proceso de conversión a bioetanol, donde la temperatura y el tamaño del inóculo de la levadura, juegan un papel importante. Este último tiene gran influencia en los procesos típicos de conversión de la biomasa, específicamente en la fermentación de los azúcares, donde una de las levaduras tradicionalmente utilizada en las tecnologías de fermentación de etanol es la *Saccharomyces cerevisiae* (Zabed *et al.*, 2017).

El potencial de la biomasa para la producción de bioetanol también viene dado por la energía necesaria para su obtención, siendo necesario los balances de energía con la finalidad de reducir el consumo y lograr una alta eficiencia energética. Por lo tanto, una operación agrícola es eficiente cuando la energía obtenida es mayor a la utilizada; sin embargo, la relación energética depende del cultivo, del sistema de producción y su intensidad de manejo. Ésta última asociada principalmente con la

óptima administración de los recursos utilizados en el proceso productivo como el agua, combustibles, fertilizantes, pesticidas, maquinaria, electricidad y otros (Garofalo *et al.*, 2018).

De manera general la obtención de bioetanol es un proceso complejo que continuamente debe ser mejorado, más aún por la introducción de nuevas materias primas. Por lo tanto, la incorporación de un nuevo material vegetal requiere la evaluación de su potencial aplicación; así, el estudio de la variedad de sorgo dulce ROGER generará el conocimiento básico para su aprovechamiento como futura fuente de bioetanol.

1.2 Hipótesis de la Investigación

Los sistemas de producción utilizados en el cultivo de la variedad de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ROGER permiten la obtención de altos rendimientos en la producción de bioetanol.

1.3 Objetivo General

Evaluar el potencial de la variedad de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ROGER en la obtención de bioetanol de primera generación bajo diferentes sistemas de producción.

1.3.1 Objetivos específicos

1. Determinar el sistema de producción del cultivo más rentable considerando la relación costo energético-beneficio.
2. Definir la etapa fenológica de la planta con mejores rasgos agronómicos asociados con la obtención de bioetanol.
3. Establecer la cinética de conversión a bioetanol del jugo de diferentes sistemas producción del cultivo.

CAPÍTULO 2: BALANCE DE ENERGÍA EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE SORGO DULCE [*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH] DESTINADO A LA OBTENCIÓN DE BIOETANOL

Fecha de publicación: 6 de mayo 2019 (Apéndice 1)

2.1 Resumen

La creciente demanda mundial de energía y la reducción de la energía basada en el petróleo están impulsando la búsqueda de nuevas fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente, por lo que es necesario optimizar los procesos relacionados con estas fuentes. El objetivo de este trabajo fue determinar el comportamiento de los parámetros agronómicos y la energía invertida en los sistemas de producción de la variedad de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ROGER para definir las condiciones óptimas de producción. Con este fin, se establecieron tres métodos de labranza (labranza mínima, tradicional y tradicional con penetración de profunda) y tres tipos de fertilizantes (inorgánico, orgánico y sin fertilizante). Para estimar la eficiencia energética se consideraron las entradas y las salidas de energía de cada sistema. La labranza tradicional con rotura del piso de arado y el fertilizante orgánico mostraron los mayores valores de altura de la planta (2.45 y 2.39 m,

respectivamente); rendimiento de biomasa fresca (51.66 y 50.77 t·ha⁻¹, respectivamente), tallo (42.7 y 41.05 t·ha⁻¹, respectivamente), jugo (20,783.12 y 22,529.59 L·ha⁻¹, respectivamente) y grados Brix (16.04 y 15.01, respectivamente). Sin embargo, la mayor eficiencia energética se registró en el SP que utilizó la labranza mínima, con un valor de 15.11, así como, cuando no se aplicó fertilizante con 18.68.

2.2 Introducción

La demanda energética se ha incrementado con el transcurso de los años, asociado a problemáticas como el aumento del número de habitantes, la extensión de las grandes urbes, el aumento del nivel de vida, la contaminación global, la reducción de los recursos naturales y de las áreas productivas, además de la extinción de especies vegetales y animales. Una alternativa que contribuye a disminuir los efectos negativos ante esta situación es incrementar la utilización de fuentes de energía renovables, que además de mejorar la eficiencia en los procesos de producción, disminuye el consumo de energía sin afectar la calidad de vida (Su *et al.*, 2015; Rocha *et al.*, 2018). Así, los balances energéticos permiten evaluar y comparar la eficiencia de los sistemas de producción de las energías alternativas (Haciseferogullari *et al.*, 2003). La eficiencia energética favorece una agricultura sostenible (Pervanchon *et al.*, 2003), considera las entradas y salidas de energía del sistema de producción (Figura 2.1, primera etapa), sin embargo, los usos y la producción de energía difieren ampliamente entre cultivos, sistemas de producción e intensidades de manejo. Como tal, la eficiencia de un proceso de producción se mide por la relación entre los beneficios obtenidos y los recursos utilizados. Por lo tanto, es importante seleccionar

el método de análisis correcto y las herramientas adecuadas. Aunque, en muchos casos, esto depende de aprovechar eficientemente los recursos disponibles (convencionales) sin afectar la eficiencia y la calidad del proceso (Wiśnicki *et al.*, 2017). Las prácticas de gestión tienen efectos considerables en la contribución y la eficiencia energética de los sistemas de producción del cultivo (Rathke *et al.*, 2007); así, la demanda energética en la agricultura se clasifica de acuerdo con los aportes energéticos de cada sistema de producción (Esengun *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2014). Un proceso eficiente requiere que la energía invertida en la producción de una unidad de biocombustibles, incluidas sus etapas agrícolas e industriales, sea menor que la energía que abandona el sistema (Larnaudie *et al.*, 2016).

Los biocombustibles generalmente derivan de la biomasa vegetal o animal y proporcionan una fuente viable de energía. Varios estudios han demostrado que las plantas cultivadas para estos fines podrían reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero (Mathur *et al.*, 2016). De acuerdo con Bai *et al.* (2010), la biomasa más común para la producción de combustible incluye maíz, trigo, caña de azúcar, remolacha azucarera y sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Estas fuentes han demostrado un gran potencial como sustitutos de los combustibles convencionales y en la reducción de las emisiones contaminantes.

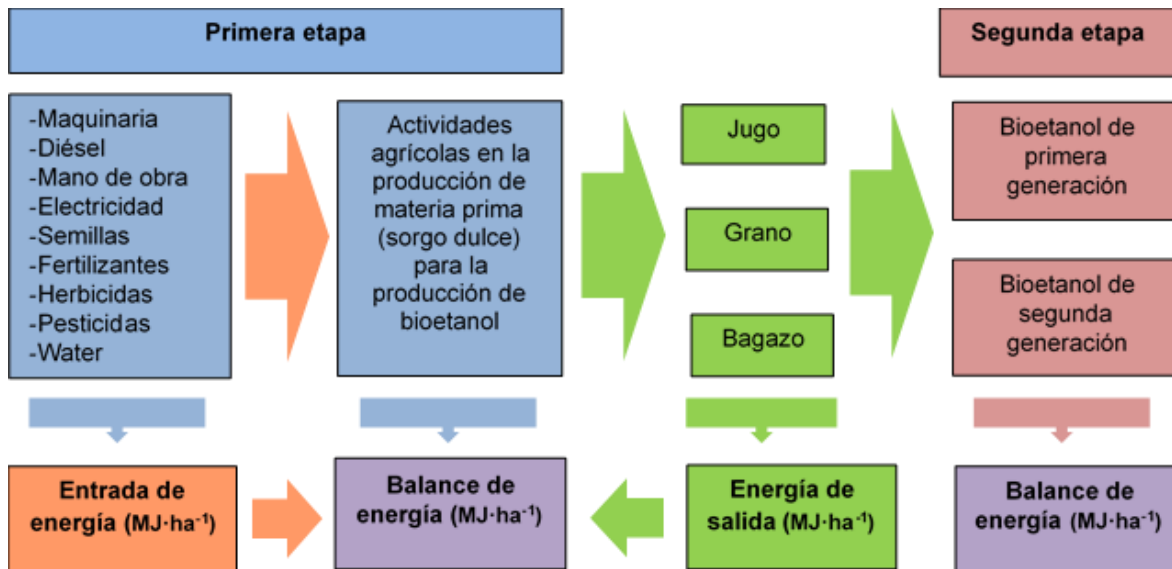


Figura 2.1. Diagrama de bloques de la producción de materia prima de sorgo dulce (primera etapa) y sus respectivas entradas y salidas de energía del sistema.

El sorgo dulce ha demostrado una gran adaptabilidad y resistencia a la sequía, las altas temperaturas y la salinidad. Sus características lo convierten en una materia prima ideal para la producción sostenible de biocombustibles con grados Brix de 13–24%, sacarosa en jugo de 7.2–15.5%, rendimiento total de azúcar en tallo de hasta $12 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, rendimiento de fresco tallo de $24\text{--}120 \text{ mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, y un rendimiento de biomasa de $36\text{--}140 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Vermerris y Saballos 2013; Cifuentes *et al.*, 2014; Regassa y Wortmann, 2016). Sin embargo, los rendimientos varían según la variedad, las condiciones de cultivo (suelo, agua, clima, plagas y enfermedades), insumos y prácticas agronómicas (Mishra *et al.*, 2017). En comparación con otros cultivos, tiene un menor uso de insumos debido a la combinación favorable de sus características agronómicas y tecnológicas, lo que lo convierte en una de las mejores materias primas en la producción de azúcar y biocombustibles (Cosedido *et al.*, 2013; Barcelos *et al.*, 2016; Bonin *et al.*, 2018). La alta capacidad del brote permite realizar varias cosechas a la misma planta, reduciendo así, el costo de la mano de obra, el tiempo de

preparación del suelo y de la siembra, el uso de semillas y la energía (Tsuchihashi y Goto, 2004). El sorgo dulce produce más etanol por unidad de área que otros cultivos. La transformación del jugo requiere menos reacciones químicas y energía, con un costo mínimo de cultivo, que puede ser tres veces menor que el de la caña de azúcar. Estas características hacen que el sorgo dulce sea un cultivo adecuado para la producción de bioetanol. Además de su producción de biomasa con un suministro de agua limitado (Pabendon *et al.*, 2017). Sobre la base de los puntos mencionados anteriormente, el objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento de los parámetros agronómicos y la energía invertida en los sistemas de producción de la variedad de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ROGER para definir las condiciones óptimas de producción.

2.3 Materiales y Métodos

2.3.1 Descripción del Sitio

La investigación se realizó en el Unidad Académica Marín, perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL), ubicada en el km 17 de la carretera Zuazua-Marín, en el municipio de Marín, Nuevo León. Geográficamente se ubica en las coordenadas 25° 53' LN/100° 02' LO, a una altura de 355 msnm. El clima corresponde a un BS₁ (h') hw (e'), descrito como seco estepario cálido con lluvias en verano, precipitaciones anuales que fluctúan entre 250-500 mm y temperatura media anual de 22 °C. El tipo de suelo es vertisoles, delgados,

compactados, con altos contenidos de arcilla y carbonato de calcio, bajos contenidos de materia orgánica y pH entre 7.5- 8.5 (Williams-Alanís *et al.*, 2017).

2.3.2 Material Vegetal

Se utilizó la variedad de sorgo dulce ROGER, un genotipo registrado en la Secretaría de Agricultura de México en el Catálogo de Variedades Vegetales con el código SOG - 261 - 050315. Este genotipo tiene aproximadamente 75 días para la floración, una altura de planta de 2.4 m, con un rendimiento promedio de 45 t·ha⁻¹ de peso fresco y un ciclo de cultivo de 130 días.

2.3.3 Establecimiento y Diseño de Experimentos

El diseño experimental fue por bloques completos al azar con arreglos en parcelas divididas y tres repeticiones. Los tratamientos se establecieron a partir de tres métodos de labranza y tres tipos de fertilizantes. Los métodos de labranza (L) correspondieron a las parcelas principales y el fertilizante (F) se distribuyó dentro de cada parcela principal en las subparcelas. Cada unidad experimental fue de 250 m². Los tratamientos fueron: L1= labranza mínima (desbroce y rastra); L2= labranza tradicional (desbroce, arado y rastra); L3= labranza tradicional con penetración profunda (desbroce, arado de subsuelo, arado y rastra); F1= fertilizante orgánico; F2= fertilizante inorgánico; y F3= sin fertilizante. En total, hubo nueve tratamientos a partir de la combinación de los factores mencionados.

2.3.4 Parámetros Agronómicos

Los parámetros agronómicos consistieron en: 1) días para la floración (DF), cuando el 50% de las plantas estaba en floración. 2) altura de planta (AP): desde el suelo hasta el ápice de la panícula. Además, a partir de una muestra de 200 plantas por tratamiento, se estimaron las siguientes variables: 3) rendimiento de biomasa fresca de la planta (RBF); 4) rendimiento de tallo fresco (RTF); 5) rendimiento de hoja fresca (RHF); 6) rendimiento de espiga fresca (REF), medido únicamente como el peso de las espigas incluyendo al grano; 7) rendimiento de jugo por su peso (RJP), después de hacer la extracción correspondiente de los 200 tallos, se colectó el jugo y se pesó; 8) rendimiento de jugo por su volumen (RJV), con una probeta graduada se midió el volumen del jugo obtenido de los 200 tallos; 9) grados Brix se midieron utilizando un refractómetro digital manual (ATAGO® 3810, PAL-1, Atago USA Inc., Bellevue, USA), colectando una muestra del jugo, suficiente para cubrir el sensor del refractómetro y, 10) peso seco total de planta y así, el rendimiento de biomasa seca (RBS), obtenido al secar en una estufa (HAFO® serie 1600, USA) a 65 °C hasta alcanzar un peso constante, una muestra de 10 plantas de las 200 cosechadas de cada unidad experimental.

2.3.5 Labores Agrícolas

La preparación de los tratamientos experimentales se inició tres meses antes de la siembra con la labor de desbroce. Después de 21 días que se encontraba seca y en descomposición, se realizó la labor de arado de subsuelo según los tratamientos,

introduciendo el cincel a una profundidad de 0.75 m. Después de un reposo de 45 días, se efectuaron las labores de arado y rastra, ambas con implementos de discos a una profundidad de 0.29 m y 0.23 m, respectivamente. Posteriormente, se realizó la labor de cruce y recuce con rastra de disco. La siembra se realizó a 0.05 m de profundidad, a distancia entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 0.07 m, para una densidad de 178,500 plantas·ha⁻¹. Se utilizó un sistema de riego por goteo superficial. El fertilizante orgánico se aplicó 20 días previos a la siembra, con una dosis de 3 t·ha⁻¹ de gallinaza (N: 60 kg·ha⁻¹; P: 65 kg·ha⁻¹; K: 75 kg·ha⁻¹). El fertilizante químico se aplicó en el momento de la siembra (N: 50 kg·ha⁻¹, P: 25 kg·ha⁻¹) y 25 días posteriores a esta (N: 50 kg·ha⁻¹ y P: 25 kg·ha⁻¹). El control de plagas, así como de plantas indeseables fueron realizados con la aplicación de los plaguicidas Pounce 340 CE[®], Murralla[®] y el herbicida Fito Amina 40[®], respectivamente. Siguiendo las especificaciones de la hoja técnica. La cosecha se realizó al final de la etapa siete (grano lechoso) descrita por Vanderlip (1993), periodo en el cual alcanzan la máxima concentración de azúcar en el jugo del tallo (Dávila-Gómez *et al.*, 2011). Las plantas se cosecharon manualmente a una altura de corte de 0.03 m a 0.04 m desde base del tallo.

2.3.6 Balance de Energía

2.3.6.1 Energía en las labores agrícolas mecanizadas

Para establecer el consumo de energía en las labores agrícolas mecanizadas se utilizó la metodología descrita por De las Cuevas et al. (2011) y Paneque y Sánchez (2006), basados en las propuestas de Bridges y Smith (1979) y apoyada por los antecedentes presentados por Stout (1990). Esta metodología determina el costo

energético en MJ·h⁻¹ adicionando la energía requerida en materiales de construcción, fabricación y transporte, combustible, lubricantes/filtros, mantenimiento/reparación, mano de obra, fertilizantes, pesticidas y semillas. Para ello se utilizaron los equivalentes de energía mostrados en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Equivalentes energéticos.

Particularidades	Unidad	EQ (MJ·Unidad ⁻¹)	Fuente
LH Manual	h	1.96	(Tabatabaeefar <i>et al.</i> , 2009)
LH Mecanizada		1.05	(Singh y Mittal, 1992)
Maquinaria	kg	138*	(Tabatabaeefar <i>et al.</i> , 2009)
Combustible diésel	L	47.8	(Kitani y Jungbluth, 1999)
Nitrógeno	kg	77.5	(Vilche <i>et al.</i> , 2006)
Fósforo	kg	12.44	(Yilmaz <i>et al.</i> , 2005)
Potasio	kg	11.15	(Yilmaz <i>et al.</i> , 2005)
Insecticida	kg	278	(Meul <i>et al.</i> , 2007)
Herbicida	kg	214	(Meul <i>et al.</i> , 2007)
Estiércol avícola	kg	0.3	(Singh y Mittal, 1992)
Semilla	kg	59.50	(Paneque y Sánchez, 2006)
Agua de riego	m ³	1.02	(Ren <i>et al.</i> , 2012)
Electricidad	kW·h	11.93	(Mohammad <i>et al.</i> , 2008)
Transporte	MJ·km ⁻¹ ·t ⁻¹	4.5	(Tabatabaeefar <i>et al.</i> , 2009)

EQ= energía equivalente; LH= labor humana; *Incluye el costo energético en la producción del acero más un 50% en el ensamblaje.

El gasto total de energía (*EST*) en la labor agrícola mecanizada se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$EST = ESM + ESC + ESL + ESI + ESR + ESO + ESE \quad (1)$$

donde *ESM* es la energía invertida en materiales, fabricación y transporte (MJ·h⁻¹), *ESC* es la energía invertida en combustible (MJ·h⁻¹), *ESL* es la energía invertida en lubricantes/filtros (MJ·h⁻¹); *ESI* es la energía invertida en semillas, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas (MJ·h⁻¹), *ESR* es la energía invertida en mantenimiento y reparación (MJ·h⁻¹), *ESO* es la energía invertida en labor humana (MJ·h⁻¹), *ESE* es la

energía invertida en electricidad ($\text{MJ}\cdot\text{h}^{-1}$) (Hatirli *et al.*, 2005). ESL y ESR se estimaron de acuerdo con Fluck (1985) y Paneque *et al.* (2002) como 5% de ESC y 129% de ESM , respectivamente.

La energía invertida en materiales, fabricación y transporte (ESM) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$ESM = \frac{Gt * EUt}{VUt} + \frac{Gm * EUm}{VUm} \quad (2)$$

donde: Gt es el peso del tractor (kg), Gm es el peso de la máquina agrícola (kg), EUt es la energía por unidad de masa del tractor ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), EUm es la energía por unidad de masa de la máquina agrícola ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Tabatabaeefar *et al.*, 2009), VUt es la vida útil del tractor (h), VUm es la vida útil de la máquina agrícola (h). Los valores de Gt , Gm , VUt , VUm según las especificaciones técnicas en el catálogo del fabricante.

La energía correspondiente al combustible (ESC) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$ESC = Gh * Eq \quad (3)$$

donde G_h es el consumo por hora de combustible ($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$), determinado por diferencia de volumen de combustible (L) en el depósito del tractor (inicial y final) una vez terminada la actividad agrícola entre el tiempo de operación (h), E_e es la energía equivalente del combustible ($\text{MJ}\cdot\text{L}^{-1}$) (Kitani y Jungbluth, 1999). La energía utilizada en lubricantes/filtros y mantenimientos/reparaciones ($ESmr$) se estimó según Fluck

(1985) y Paneque et al. (2002), como el 5% y el 129% de la *ESC* y *ESM* respectivamente.

La energía correspondiente a semillas, fertilizantes, herbicidas y plaguicidas (*ESI*), se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$ESI = N_{sem} + Eq_{sem} + \sum_{n=1}^{n=s} Fer * Eq_{Fer} + \sum_{n=1}^{n=s} Her * Eq_{Her} + \sum_{n=1}^{n=s} Ins * Eq_{Pla} \quad (4)$$

donde N_{sem} es la cantidad de semillas plantadas ($kg \cdot ha^{-1}$), Eq_{sem} es la energía equivalente en la producción de las semillas ($MJ \cdot kg^{-1}$) (Ren et al., 2012), Fer es la cantidad de fertilizante aplicado ($kg \cdot ha^{-1}$), Eq_{Fer} es la energía equivalente en la producción del fertilizante ($MJ \cdot kg^{-1}$) (Vilche et al., 2006; Yilmaz et al., 2005), Her es la dosis aplicada de herbicida ($L \cdot ha^{-1}$), Eq_{Her} es la energía equivalente en la producción del herbicida ($MJ \cdot L^{-1}$) (Meul et al., 2007), Pla es la dosis aplicada de plaguicidas ($L \cdot ha^{-1}$) y Eq_{Pla} es la energía equivalente en la producción del plaguicidas ($MJ \cdot L^{-1}$) (Meul et al., 2007).

La energía secuestrada por hectárea (*ESH*) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$ESH = \frac{EST}{Wh} \quad (5)$$

Donde *EST* es el gasto total de energía en la labor agrícola mecanizada ($MJ \cdot h^{-1}$) y *Wh* es el rendimiento horario en la operación agrícola mecanizada ($ha \cdot h^{-1}$).

2.3.6.2 Índices energéticos

Los índices energéticos se determinaron según Tabatabaie et al. (2013) y Nabavi et al. (2016) como sigue:

Relación Energética o Eficiencia Energética (EE) es la energía proporcionada por el(los) producto(s) resultante(s) del proceso productivo con respecto a la energía requerida para su obtención. Se utiliza principalmente cuando dicho proceso es para la generación de energía (ecuación 6).

$$\text{Eficiencia energética} = \frac{\text{Energía de salida (MJ} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}}{\text{Energía de entrada (MJ} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}} \quad (6)$$

Productividad Energética (PE) es la relación entre la cantidad de producto(s) medida en unidades de masa y la energía requerida para su obtención (ecuación 7).

$$\text{Productividad energética} = \frac{\text{Rendimiento de sorgo (kg} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}}{\text{Energía de entrada (MJ} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}} \quad (7)$$

Energía Específica (EP) es la relación entre la energía proporcionada por el(los) producto(s) resultante(s) del proceso productivo y la cantidad de producto(s) medida en unidades de masa (ecuación 8).

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Energía de salida (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Rendimiento de sorgo (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (8)$$

Ganancia Neta de Energía o Energía Neta (EN) es la diferencia entre la energía proporcionada por el(los) producto(s) resultante(s) del proceso productivo y la requerida para su obtención (ecuación 9).

$$\text{Energía neta} = \text{Energía de salida (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Energía de entrada (MJ ha}^{-1}\text{)} \quad (9)$$

El poder calorífico de la biomasa seca del sorgo (espiga, hoja, tallo) se determinó utilizando una bomba calorimétrica isotérmica marca Parr® modelo 1241, siguiendo la metodología descrita en la NORMA Oficial Mexicana. "Determinación del Poder Calorífico en Desechos Sólidos". DGN-AA-33-1976. Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Nutrición y Calidad de los Alimentos de la Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León.

2.3.7 Análisis Estadístico

El efecto de los diferentes sistemas de producción en la productividad y las características agronómicas del cultivo se determinaron a través de un análisis de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, utilizando el paquete estadístico SPSS Statistics para Windows. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación de medias por el método de Tukey con una probabilidad de 5%.

2.4 Resultados y Discusión

2.4.1 Parámetros Agronómicos

El análisis de varianza de los parámetros agronómicos en la variedad ROGER se muestra en el Cuadro 2.2. Se pudo observar diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) y altamente significativas ($P < 0.01$), pero sin interacción labranza x fertilización ($P > 0.05$).

Cuadro 2.2. Cuadrados medios para el análisis de varianza de los parámetros agronómicos.

F.V.	G.L.	CM									
		DF	AP	RBF	RTF	RHF	REF	RJP	RJV	°Bx	RBS
Rep	2	17.37	0.01	30.14	18.01	0.14	1.20	1.67	9,71·106	6.17	44.25
L	2	22.48 ns	0.07 **	158.02 *	141.11 *	1.37 **	0.43ns	36.70 *	2.83·107 *	9.80 *	45.66 *
Error (a)	4	4.04	0.0019	13.63	11.07	0.07	0.69	14.39	6.85·106	0.98	10.26
F	2	23.59 ns	0.01 *	71.96 *	33.58 *	0.66 *	3.86*	51.15 *	8.74·107 *	2.01 ns	14.77 ns
L x F	4	1.93 ns	0.002 ns	4.75 ns	3.47 ns	0.04 ns	0.61 ns	9.37 ns	7.48·106 ns	0.96 ns	14.31 ns
Error (b)	12	11.43	0.0012	14.50	8.32	0.10	0.86	3.94	6,01·106	1.06	10.67
C.V. (%)		4.56	1.48	7.96	7.41	8.68	17.55	9.84	12.76	6.91	23.02

F.V. = fuente de variación; G.L. = grados de libertad; CM = cuadrado medio; Rep = repetición; L= labranza; F= fertilizante; C.V. = coeficiente de variación. **, $P < 0.01$; *, $P \leq 0.05$; ns, $P > 0.05$.

La comparación de medias (Cuadro 2.3) mostró que entre tratamientos de labranza, el L3 tuvo los máximos valores de AP (2.45 m), RBF (51.66 t·ha⁻¹), RTF (42.70 t·ha⁻¹), RJP (21.89 t·ha⁻¹), RHF (3.93 t·ha⁻¹), RBS (14.76 t·ha⁻¹), RJV (20,783.12 L·ha⁻¹) y °Bx (16.04), aunque todas las variables con excepción de AP fue estadísticamente igual a L2; sin embargo, ningún tratamiento presentó diferencia significativa ($P > 0.05$) en DF y REF. Estos resultados pueden deberse a la mayor profundidad en el tratamiento de labranza, lo cual puede permitir la ruptura del piso de arado y, por tanto, un mayor desarrollo de raíces y disponibilidad de nutrientes. Además, la preparación de suelo contribuye al incremento de la infiltración y

aprovechar mejor el agua de lluvia, controlando algunas estructuras en reposo de hongos y semillas de malezas (Rathke *et al.*, 2007; Tricai *et al.*, 2016). En cuanto a los fertilizantes, F1 tuvo los mayores valores de AP (2.39), RBF (50.77 t·ha⁻¹) RTF (41.05 t·ha⁻¹), RJP (22.57 t·ha⁻¹), RHF (3.86 t·ha⁻¹), REF (5.86 t·ha⁻¹) y RJV (22,529.59 L·ha⁻¹), mientras que DF, RBS y los °Bx no fueron diferentes entre tratamientos (P>0.05). Cabe mencionar que, para las variables mencionadas F1 fue estadísticamente igual a F2.

Cuadro 2.3. Comportamiento agronómico del sorgo dulce por tratamiento de labranza (L) y de fertilización (F).

Tx	DF	AP (m)	Fertilización (F)					RBS	RJV (L·ha ⁻¹)	°Bx
			RBF	RTF	RJP	RHF	REF			
L1	75.89	2.28 c	43.35 b	34.81 b	17.95 b	3.17 b	5.37	10.27 b	17,285.83 b	14.01 b
L2	73.33	2.38 b	48.44 a	39.34 a	20.69 ab	3.66 a	5.43	12.18 ab	19,534.96 ab	14.62 ab
L3	73.00	2.45 a	51.66 a	42.70 a	21.89 a	3.93 a	5.03	14.76 a	20,783.12 a	16.04 a
F1	72.78	2.39 a	50.77 a	41.05 a	22.57 a	3.86 a	5.86 a	13.53 a	22,529.59 a	15.01
F2	73.56	2.38 ab	47.53 ab	38.54 ab	20.16 ab	3.59 ab	5.40 ab	12.67 a	18,722.60 b	15.29
F3	75.89	2.33 b	45.14 b	37.26 b	17.80 b	3.32 b	4.57 b	11.01 a	16,351.71 b	14.37

Tx= tratamiento. Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey, P≤0.05).

En general, los valores de AP obtenidos fueron mayores a los reportados por Oyier *et al.* (2017) para el genotipo EUSS10 (1.88 m). Existe una gran heterogeneidad de AP en los diferentes genotipos y variedades del sorgo dulce, que pueden variar por las condiciones de producción y entre genotipos (Disasa *et al.*, 2017). Cabe destacar que las variedades dulces llegan alcanzar más altura que las productoras de grano (Reddy *et al.*, 2017), y son de gran interés tecnológico en la producción de biomasa y bioenergía (Disasa *et al.*, 2017). Los resultados de RBF, RTF y RBS fueron similares

a los reportados en otras variedades de sorgos destinadas a la producción de bioetanol, con valores entre 35 t·ha⁻¹ a 52.12 t·ha⁻¹ (Pothisoong y Jaisil, 2011).

Con respecto a los parámetros de producción del jugo, el RJP, RJV y °Bx mostraron similitud con lo reportado en otras variedades con rangos para RJP de 16.43 t·ha⁻¹ (Ramada) a 28.10 t·ha⁻¹ (Mn-4508), RJV de 13,546.6 L·ha⁻¹ (EUSS10) a 22,976.9 L·ha⁻¹ (SS04) y de °Bx de 11.26 (Mn-1054) a 19.12 (SS-301) (Oyier *et al.*, 2017; Khalil *et al.*, 2015). Estos parámetros pueden variar por factores genéticos, climáticos y edáficos (Amaducci *et al.*, 2004). Cabe mencionar que, independientemente de las condiciones limitadas de materia orgánica del suelo fueron obtenidos altos rendimientos agronómicos con la aplicación de los niveles de nitrógeno recomendados (80 kg·N·ha⁻¹ a 120 kg·N·ha⁻¹) para sorgo dulce (Sawargaonkar y Wani, 2016; Almodares *et al.*, 2008), indicando la alta capacidad de adaptación de ROGER.

2.4.2 Balance de Energía

2.4.2.1 Energía en el trabajo agrícola mecanizado

El Cuadro 2.4 muestra el gasto de energía en las labores agrícolas mecanizadas para la producción de sorgo dulce. Se observa que la labor de máxima demanda energética fue la F2 (9,184.85 MJ·ha⁻¹). Sin embargo, fue menor a 15,801 MJ·ha⁻¹ reportado por Ren *et al.* (2012) en otra variedad sorgo dulce. Tal comportamiento podría ser el resultado de una dosis de fertilización más baja, específicamente nitrógeno. Por lo tanto, nuestros resultados confirman que los fertilizantes minerales (inorgánicos) entre las diferentes fuentes de energía, son los que más contribuyen al

consumo energético (Monti y Venturi, 2003; Ding *et al.*, 2017). Esto es particularmente evidente con los fertilizantes nitrogenados.

Cuadro 2.4. Gasto energético de las labores agrícolas mecanizadas en el sorgo dulce.

Labor	ESM	ESC ⁺	ESL	ESR	ESO	ESI	Total
	MJ·ha ⁻¹						
Desbroce ^²	27.94	478.80 [£]	23.94	36.04	0.63	-	567.35
Aradura	113.69	2,244.58	112.22	146.67	1.46	-	2,618.63
Subsuelo	192.96	3,881.79 [¶]	194.09	248.91	2.23	-	4,519.98
Rastra	93.07	1,277.32	63.86	120.06	0.90	-	1,555.21
Cruce	89.99	1,142.95	57.15	116.09	0.87	-	1,407.05
Recruce	83.12	1,155.86	57.79	107.23	0.80	-	1,404.81
Siembra	115.24	956.77	47.84	148.66	9.69	417.20 [¥]	1,695.40
Fertilización orgánica	58.55	656.95	32.85	75.52	5.25	2700 [§]	3,529.11
Fertilización inorgánica [^]	58.55	677.48	33.88	37.55	5.39	8372 [§]	9,184.85
Escarda	38.65	983.10	49.16	49.86	0.96	-	1,121.73
Cultivo y aporque	25.73	674.71	33.73	33.20	0.63	-	768.00
Control de malezas	50.99	532.08	26.61	65.78	7.06	321 [¶]	1,003.50
Control de plagas	53.72	506.29	25.31	69.30	2.21	417 [¶]	1,073.83
Riego	139.56	2,743.68 ^{&}	110.08	180	7.84	214.87 [#]	3,396.03
Cosecha, transporte y molienda	179.5	2,759.2	137.95	231.55	24.85	-	3,333.05

†, Principal fuente de energía; ^, labor de máxima energía requerida; ², labor de mínima energía requerida; ¶, mayor entrada de energía por combustible; £, menor entrada de energía por combustible; ¥, energía requerida en semilla; §, energía requerida en fertilizantes minerales; ¶, energía requerida en químicos; &, electricidad; #, agua de riego.

Dentro de los requerimientos energéticos en todo el trabajo realizado, la principal fuente de energía para su ejecución fue el combustible diésel, coincidiendo con las investigaciones de Monti y Venturi (2003). La labor de arado de subsuelo tuvo el gasto máximo de energía (3,881.79 MJ·ha⁻¹). Este resultado está relacionado con la profundidad de trabajo, la dimensión de los equipos, la velocidad de trabajo, las condiciones (principalmente por el grado de compactación) y el tipo de suelo (Paneque y León, 2007).

La tracción de las máquinas agrícolas depende de la resistencia mecánica del suelo a la penetración, que a su vez está influenciada por la profundidad de trabajo y el área de contacto entre la herramienta y suelo. Para esta última la geometría de la

herramienta de corte (ángulo de ataque) es decisiva (Palma *et al.*, 2010). Por lo tanto, se podría lograr una reducción en los costos de energía en las labores de alto consumo de combustible (arado de subsuelo y arado) mediante el empleo de multiarados que reducen el número de labores (Paneque y León, 2007). Por el contrario, las labores de menor costo energético corresponden a la labranza superficial del suelo (Paneque y Rodríguez, 2006), como la labor de desbroce.

2.4.2.2 Índices de energía

Los índices de energía en los sistemas de producción mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y altamente significativas ($P < 0.01$), sin interacción entre los tratamientos de labranza y de fertilización (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Análisis de varianza en los índices de energía.

F.V.	G.L.	CM					
		EE	ES	EF	PE	EP	EN
Repetición	2	$7.27 \cdot 10^6$	$1.75 \cdot 10^9$	0.12	0.03	0.03	$1.53 \cdot 10^9$
Labranza	2	$1.27 \cdot 10^8$ **	$4.73 \cdot 10^9$ *	15.67 **	0.28 *	0.25 **	$3.41 \cdot 10^9$ *
Error (a)	4	$2.96 \cdot 10^6$	$6.79 \cdot 10^8$	0.19	0.03	0.05	$5.97 \cdot 10^8$
Fertilización	2	$1.81 \cdot 10^8$ **	$5.6 \cdot 10^9$ *	44.89 **	0.89 **	0.10 ns	$5.08 \cdot 10^9$ *
Labranza x Fertilización	4	$2.01 \cdot 10^5$ ns	$3.79 \cdot 10^8$ ns	2.04 ns	0.03 ns	0.04 ns	$3.88 \cdot 10^8$ ns
Error (b)	12	$3.71 \cdot 10^6$	$1.01 \cdot 10^9$	0.13	0.05	0.03	$8.96 \cdot 10^8$
C.V. (%)		7.68	9.17	2.55	11.49	2.51	9.30

EE = Energía de entrada; ES = energía de salida; EF = eficiencia energética; PE = productividad energética; EP = energía específica; EN = energía neta; C.V. = coeficiente de variación. **, $P < 0.01$; *, $P \leq 0.05$; ns, $P > 0.05$.

El Cuadro 2.6 muestra la comparación de medias de los índices de energía para cada sistema de producción. Se observa que los sistemas de producción con L1 ($21,694.87 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$) y F3 ($21,024.31 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$), tuvieron la menor EE por hectárea. La demanda de energía fue inferior a $27.089 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ mencionados por Ren *et al.* (2012), pero fue mayor a $18,399 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ reportados por Dar *et al.* (2018). Este comportamiento

podría ser el resultado del gasto de combustible derivado de la cantidad de tareas o insumos utilizados (fertilizantes, herbicidas, insecticidas, etc.). Por otro lado, la mayor ES fue para L3 (366,349.52 MJ·ha⁻¹) y F1 (371,806.87 MJ·ha⁻¹). Estos valores están en el rango de 250,000 MJ·ha⁻¹ a 422,000 MJ·ha⁻¹ (Venturi y Venturi, 2003) y depende del rendimiento agronómico y del poder calorífico del material vegetal. El valor más alto de EF fue para L1 (14.82) y F1 (15.34). Estos valores se encuentran en el rango de 10 a 32 mencionado por Venturi y Venturi (2003) y superan el valor de 12.4 reportado por Ren et al. (2012). Nuestros resultados podrían ser producto de un manejo eficiente de los sistemas de producción, particularmente debido a la operación efectiva de la maquinaria agrícola (Dyjakon, 2018). PE está directamente relacionada con el rendimiento agronómico del cultivo y la inversión de energía en el proceso de producción. L2 (2.09 kg·MJ⁻¹) y F3 (2.16 kg·MJ⁻¹) presentaron los mayores valores, estos fueron superiores a los reportados por Monti y Venturi (2003) de 0.7 kg·MJ⁻¹.

Cuadro 2.6. Índices de energía en los sistemas de producción.

Tx	EE	ES	Índice			
	MJ·ha ⁻¹		EF	PE (kg·MJ ⁻¹)	EP (MJ·kg ⁻¹)	EN (MJ·ha ⁻¹)
L1	21,694.87 c*	321,525.07 b	14.82 a	2.05 a	7.42 a	299,830.20 b
L2	24,352.14 b	352,301.98 ab	14.47 a	2.09 a	7.27 ab	327,949.84 ab
L3	29,109.84 a	366,349.52 a	12.58 b	1.77 b	7.08 b	337,239.68 a
F1	24,238.40 b	371,806.87 a	15.34 a	2.14 a	7.33	347,568.46 a
F2	29,894.14 a	346,436.95 ab	11.59 b	1.60 b	7.30	316,542.81 ab
F3	21,024.31 c	321,932.76 b	15.31 a	2.16 a	7.13	300,908.45 b

Tx= tratamiento; L= tratamiento de labranza; F= tratamiento de fertilización; EE = Energía de entrada; ES = energía de salida; EF = relación energética; PE = productividad energética; EP = energía específica; EN = energía neta. *, Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey, P≤0.05).

En el caso de EP, el valor más alto se observó en L1 (7,42 MJ·kg⁻¹). Sin embargo, los mayores valores de EN se mostraron en L3 (337,239.68 MJ·ha⁻¹) y F1 (347,568.46 MJ·ha⁻¹), pero fueron estadísticamente iguales a L3 y F2, respectivamente. Estos

resultados superaron a otros sistemas de producción con valores de 121,500 MJ·ha⁻¹ (Ding *et al.*, 2017) y 223,928 MJ·ha⁻¹ (Dar *et al.*, 2018). Nuestros resultados muestran el potencial energético de esta variedad de sorgo dulce bajo los sistemas de producción probados, donde los índices de energía dependieron del rendimiento agronómico del cultivo, del consumo de combustible y fertilizante, así como, de las condiciones agronómicas de producción.

2.5 Conclusiones

Los parámetros agronómicos de la variedad ROGER fueron evaluados, destacando que los rendimientos de biomasa y jugo fueron considerables a pesar de ser cultivado en una zona semiárida. Asimismo, los resultados del balance de energía indicaron una alta eficiencia energética bajo los diferentes sistemas de producción. Lo que destaca su potencial en la producción de bioetanol. Lo anterior será evaluado en futuros trabajos para la obtención de bioetanol de primera y segunda generación.

CAPÍTULO 3: DINÁMICA DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y AZÚCAR EN LA VARIEDAD DE SORGO DULCE ROGER

Fecha de envío: 27 de mayo de 2020 (Apéndice 2)

3.1 Resumen

El sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un cultivo que se destaca por su alta producción de biomasa y azúcares en el jugo de sus tallos. Sin embargo, la máxima productividad puede ser alcanzada bajo las óptimas condiciones de producción y cosecha. El objetivo de este trabajo fue evaluar la productividad de la variedad de sorgo dulce ROGER en función de la dinámica de producción de azúcar y biomasa seca, considerando diferentes sistemas de producción y etapas fenológicas de la planta (EF). El diseño del experimento consistió en diferentes métodos de labranza y de fertilización establecidos en un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas y tres repeticiones. La toma de datos se realizó en cuatro EF a partir de la antesis y hasta la madurez fisiológica de la planta. Los resultados mostraron que los parámetros agronómicos evaluados dependen de la EF ($P \leq 0.05$). Mientras que, la labranza y la fertilización no tuvieron efectos sobre estos ($P > 0.05$). La distribución y acumulación de azúcar por entrenudos del tallo, además de variar con la

EF, se asoció con componentes fenológicos de la planta (longitud y diámetro del entrenudo). La acumulación de azúcar y biomasa incrementó con la madurez. En consecuencia, los mayores valores de °Bx (14.89), contenido de azúcar del jugo (22.91 g), concentración de azúcar del jugo (527.46 mg·g⁻¹ PS), biomasa seca (60.04%) y rendimiento de biomasa seca (19.01 t·ha⁻¹) fueron observados en la etapa de madurez fisiológica de la planta.

3.2 Introducción

El sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un cultivo C₄ que se puede cultivar en disímiles condiciones agroclimáticas y sistemas de producción con un mínimo de insumos. Se caracteriza por tener alta producción de biomasa y acumulación de azúcares en sus tallos, destacando su gran potencial bioenergético (Shukla *et al.*, 2017; Mathur *et al.*, 2017). Este cultivo se puede procesar como biocombustible o coproductos, sin afectar la producción de grano como alimento, combustible y forraje, reduciendo el conflicto que generan en la seguridad alimentaria, como sucede con otros cultivos con fines bioenergéticos, como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el maíz y el trigo. Además, permite múltiples ciclos de cultivo al año, con alta productividad y estabilidad agronómica, con la mínima demanda de nitrógeno (Rolz *et al.*, 2017; Dar *et al.*, 2018).

El sorgo dulce tiene una gran diversidad genética y variación de sus parámetros agronómicos, el cual se destaca sobre otros cultivos. Sin embargo, para alcanzar su máxima productividad es necesario un apropiado manejo agronómico (Regassa y

Wortmann, 2014; Maw *et al.*, 2016). En este sentido, se ha reportado que el nitrógeno influye en la producción de biomasa, contenido y tipo de azúcares del jugo. Las cuales pueden ser manipuladas favorablemente con la correcta selección del método de labranza (Adimassu *et al.*, 2019).

El potencial promisorio del sorgo dulce aumenta su horizonte de estudio, enfatizando en el uso de diferentes tipos de fertilizantes y métodos de labranza (Mishra *et al.*, 2017; Heitman *et al.*, 2017). Así como, en la estimación y evaluación del etanol basados en los rasgos agronómicos y en las características del jugo de los tallos presentes en progenitores, líneas puras y variedades que puedan ser utilizadas en la industria de los biocombustibles (Bunphan *et al.*, 2015; Xuan *et al.*, 2015). En este sentido, es importante identificar la etapa fenológica más oportuna para la cosecha, considerando la dinámica de acumulación de azúcares y la producción de biomasa (Capecchi *et al.*, 2017). Siendo, necesario puntualizar su estudio a nivel de entrenudo (Tovignan *et al.*, 2016) con la finalidad de observar la distribución de estos azúcares a lo largo del tallo. Con base en lo anterior, se realizó este trabajo con el objetivo de evaluar la productividad de la variedad de sorgo dulce ROGER, en función de la dinámica de producción de azúcar y biomasa seca, considerando diferentes sistemas de producción y etapas fenológicas de la planta.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Descripción del Sitio de Estudio

El experimento se estableció en el ciclo primavera-verano 2018, en el campo experimental Marín de la Facultad de Agronomía perteneciente a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ubicado en el municipio del Marín, en el estado de Nuevo León. Este se ubica geográficamente a 25° 52' 13,5'' latitud norte y 100° 02' 22,56'' longitud oeste, con una altitud de 355 msnm. El clima corresponde a un BS₁ (h') hw (e'), descrito como seco estepario cálido con lluvias en verano, precipitaciones anuales que fluctúan entre 250-500 mm y temperatura media anual de 22 °C. El tipo de suelo es vertisoles, delgados, compactados, con altos contenidos de arcilla y carbonato de calcio, bajos contenidos de materia orgánica y pH entre 7.5- 8.5 (Williams-Alanís *et al.*, 2017).

3.3.2 Material Vegetal

La variedad de sorgo dulce ROGER está registrada por la UANL en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales con el mismo nombre y número de registro SOG-261–050315. Este genotipo promedia 75 días para la floración, con un ciclo de cultivo de 130 días.

3.3.3 Establecimiento y Diseño Experimental

Las actividades de preparación de suelos para el establecimiento del cultivo iniciaron el 20 de noviembre de 2017 con la labor de desbroce. Posteriormente, se

realizaron las labores de rotura, arado de subsuelo y rastra, según el método de labranza. La siembra se llevó a cabo el 5 de marzo de 2018, se realizó a una profundidad de 0.05 m y distancia entre hileras de 0.8 m, utilizando una sembradora experimental (Almaco[®] CTS EO, Nevada, Iowa, USA). Fue realizado un aclareo manual 20 días posterior a la siembra hasta obtenerse una densidad promedio de 18 plantas·m². Las labores de fertilización comenzaron 20 días antes de la siembra con la aplicación del fertilizante orgánico, con dosis de 3 t·ha⁻¹ de gallinaza (N: 60 kg·ha⁻¹; P: 65 kg·ha⁻¹; K: 75 kg·ha⁻¹). Los fertilizantes inorgánicos se esparcieron durante la siembra (N: 50 kg·ha⁻¹, P: 25 kg·ha⁻¹) y 25 días después a esta (N: 50 kg·ha⁻¹ y P: 25 kg·ha⁻¹). Para el control de plagas se aplicaron los pesticidas Pounce 340 CE[®] en dosis de 0.6 L·ha⁻¹ a los días 28 y 59 después de la siembra. Para el control del pulgón amarillo se utilizó 0.3 L·ha⁻¹ de Murralla[®], aplicándolo a los días 32 y 81 después de la siembra. Para el control de malezas se aplicó 1 L·ha⁻¹ de Fito Amina 40[®] a los 35 y 64 días después de la siembra. El sistema de riego utilizado fue por cintilla (goteo superficial) y se realizó un riego antes de la siembra, además de cinco de auxilio a intervalos de 14 días.

El manejo agronómico de las parcelas experimentales fue: (1) método de labranza (L), (2) tipo de fertilizante (F), (3) posición del entrenudo (IN) en el tallo y, (4) etapa fenológica de la planta (EF). Los tratamientos experimentales (Tx) derivados a partir de diferentes L y F se establecieron un diseño de bloques completos al azar con arreglos en parcelas divididas y tres repeticiones (Cuadro 3.1). La superficie por unidad experimental fue de 250 m². Los tratamientos de labranzas fueron asignados a la

parcela grande con tres niveles: L1= labranza mínima integrada de las operaciones de desbroce y rastra (hasta 0.20 m de profundidad), L2= labranza tradicional integrada de las operaciones de desbroce, arado y rastra (hasta 0.30 m de profundidad), L3= labranza tradicional integrada de las operaciones de desbroce, arado, arado de subsuelo y rastra (hasta 0.75 m de profundidad). Los tratamientos de fertilización fueron asignados a la subparcela con tres niveles: F1= fertilizante orgánico, F2= fertilizante inorgánico, F3= sin fertilizantes. La combinación de la labranza y el fertilizante derivaron un total de nueve tratamientos.

Cuadro 3.1. Acomodo experimental y tratamientos establecidos en el estudio.

Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
Tx	Parcela	Subparcela	Tx	Parcela	Subparcela	Tx	Parcela	Subparcela
1		F1	1		F1	1		F1
2	L1	F2	2	L1	F2	2	L1	F2
3		F3	3		F3	3		F3
4		F1	4		F1	4		F1
5	L2	F2	5	L2	F2	5	L2	F2
6		F3	6		F3	6		F3
7		F1	7		F1	7		F1
8	L3	F2	8	L3	F2	8	L3	F2
9		F3	9		F3	9		F3

Tx= tratamiento experimental; L1= labranza mínima; L2= labranza tradicional; L3= labranza tradicional con inclusión de una operación de arado de subsuelo; F1= fertilizante orgánico; F2= fertilizante inorgánico; F3= sin fertilizante.

3.3.4 Registro de Datos

La toma de datos se realizó en diferentes EF descritas por Vanderlip (1993). La identificación de EF fue de manera visual (Figura 3.1). El primer muestreo (EF6) se registró cuando el 50% de las plantas por tratamiento se encontrarán en alguna fase de la floración. Para el segundo muestreo (EF7), la floración y la polinización estaban completas e iniciaba la etapa de llenado del grano. Durante el tercer muestreo (EF8),

los granos presentaban masa dura. Mientras que, para el cuarto muestreo (EF9), el cultivo se encontraba en el estado de madurez fisiológica. Se observaba la presencia de la capa negra sobre el hilio en la base de la semilla, así como, un punto negro en la región estilar una vez retira la gluma del grano. En este último muestreo no fueron realizadas las mediciones por IN.

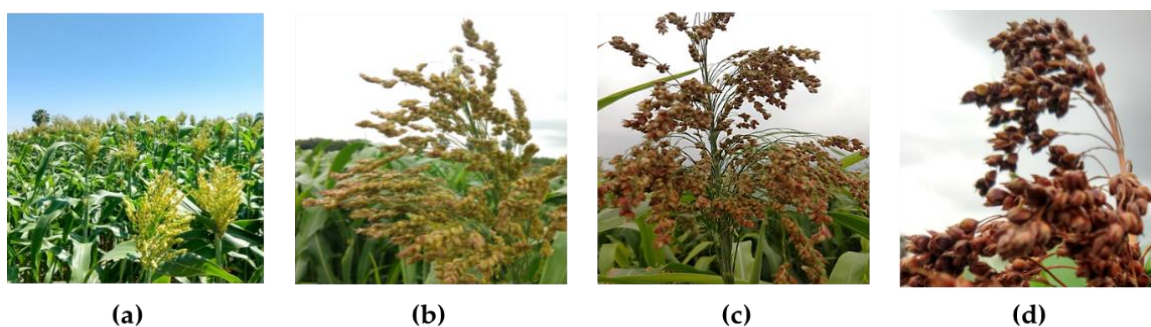


Figura 3.1. Etapas fenológicas (EF) evaluadas en la variedad de sorgo dulce ROGER: (a) el 50% de las plantas por tratamiento se encontraban en alguna fase de la floración, (b) la floración y la polinización estaban completas y comenzaba el llenado del grano, (c) los granos presentaban masa dura, (d) el cultivo se encontraba en el estado de madurez fisiológica.

3.3.5 Parámetros Agronómicos por Entrenudos

La toma de datos por IN en las EF correspondientes se realizó a partir de una muestra de 10 plantas con competencia completa por parcela. A cada planta se le eliminaron las hojas y la vaina de las hojas quedando únicamente el tallo (tallo desnudo) que se cortó de acuerdo con los nudos presentes al momento del muestreo. La medición para cada IN se realizó desde la parte superior del tallo hasta la base registrando su longitud (IL) y diámetro (ID), además de la extracción de una muestra de jugo para medir la concentración de sólidos solubles totales o grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) utilizando un refractómetro digital (ATAGO[®] 3810, PAL-1, Atago USA Inc., Bellevue, USA).

3.3.6 Biomasa

Para estimar la biomasa, la planta se separó en sus componentes morfológicos (hojas, tallo y panoja) que fueron colocados por independiente en bolsas de papel y pesadas en una báscula analítica (Romana TORREY® L-EQ, México) para obtener el peso fresco. Seguidamente, las bolsas fueron introducidas en una estufa (HAFO® serie 1600, USA) a 65 °C, hasta alcanzar un peso constante y registrar el peso seco (PS) de cada componente y, consecuentemente, el rendimiento de biomasa seca por hectárea (RBS). El porcentaje de biomasa seca (BS) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$BS_{CM} (\%) = \frac{PS_{CM} (g)}{PSP (g)} * 100 \quad (1)$$

Donde: CM es el componente morfológico, PS es el peso seco y PSP es el peso seco de la planta.

3.3.7 Dinámica de Producción de Jugo y Azúcar en el Tallo

La extracción de jugo se obtuvo de una muestra de 10 tallos por parcela en cada EF mediante en un extractor de jugos (QJH-L 100®). Este se filtró a través de un tamiz para eliminar residuos y registrar el peso de jugo (PJ) y los °Bx. También se determinó la capacidad de extracción del molino (CEJM), el contenido de azúcar del jugo (CAJ) y la concentración de azúcar del jugo (CAJN) utilizando las siguientes ecuaciones (Tovigna *et al.*, 2016; Rono *et al.*, 2018):

$$CEJM (\%) = \frac{PJ (g)}{PFT (g)} \times 100 \quad (2)$$

Donde: PJ corresponde al peso de jugo, PFT al peso fresco de tallo.

$$CAJ (g) = \frac{^{\circ}B \times 8.827 \times (PFT - PST)}{1000} \quad (3)$$

Donde: 8.827 es la pendiente de la línea de regresión entre los °Bx y la CAJN en g·L⁻¹; PST es el peso seco del tallo en g.

$$CAJN (mg \cdot g^{-1} PS) = \frac{CAJ}{PST} * 1000 \quad (4)$$

3.3.8 Análisis Estadístico

Los datos generados por el efecto de las diferentes fuentes de variación sobre las variables de estudios fueron contrastados estadísticamente a través de un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias, de acuerdo con la prueba de LSD Fisher a un grado de significación del 95% (P≤0.05). Además, de una correlación mediante el coeficiente Pearson. A los datos porcentuales (Yi) se les realizó una transformación angular [arcoseno (Yi)^{1/2}] y una vez procesados estadísticamente fueron transformados a la escala original (%). Los análisis se realizaron en el software estadístico InfoStat.

3.4 Resultado y Discusión

3.4.1 Parámetros Agronómicos por Entrenudos

El análisis combinado de varianza para los rasgos agronómicos estudiados por IN se presenta en el Cuadro 3.2. Se observó diferencia estadística significativa ($P < 0.01$) por EF solo para °Bx y por IN para todos los rasgos estudiados. En cuanto a las interacciones, fue observada diferencia significativa ($P < 0.01$) en la interacción IN x EF para °Bx y IL.

Cuadro 3.2. Cuadrados medios del análisis de varianza de los parámetros agronómicos por entrenudos en las etapas fenológica de la planta y en los sistemas de producción.

F.V.	G.L.	CM		
		°Bx	IL	ID
EF	2	127.89**	9.44 ns	0.21 ns
EF > R	6	51.04 ns	48.66 ns	2.55 ns
L	2	45.68 ns	23.11 ns	0.05 ns
EF x L	4	9.43 ns	2.42 ns	0.36 ns
EF > R x L	12	20.43	11.47	0.42
F	2	7.37 ns	13.36 ns	0.12 ns
F x EF	4	11.62 ns	0.75 ns	0.32 ns
F x L	4	6.42 ns	10.23 ns	1.44 ns
F x EF x L	8	11.54 ns	13.58 ns	0.98 ns
EF > L > R x F	36	15.6	10.72	0.92
IN	9	244.78**	3990.09**	5.39**
IN x EF	18	16.72**	30.79**	0.05 ns
IN x L	18	3.25 ns	10.22 ns	0.02 ns
IN x F	18	1.63 ns	5.76 ns	0.02 ns
IN x EF x L	36	1.25 ns	6.56 ns	0.02 ns
IN x EF x F	36	1.86 ns	4.15 ns	0.02 ns
IN x L x F	36	1.71 ns	5.55 ns	0.05 ns
Error	558	1.76	10.74	0.03
C.V. (%)		13.77	15.16	14.62

F.V.= fuente de variación; G.L.= grados de libertad; CM= cuadrados medios; °Bx = grados Brix; IL= longitud del entrenudo; ID = diámetro del entrenudo; EF = etapa fenológica; R= repetición; L = labranza; F = fertilización; IN = entrenudo; C.V. = coeficiente de variación. **, $P < 0.01$. *, $P \leq 0.05$. ns, $P > 0.05$.

3.4.2 Distribución y Acumulación de Azúcar en los Entrenudos

Conociendo que el tallo de sorgo dulce es un gran sumidero de carbohidratos no estructurales (Bihmidine *et al.*, 2015) y que, la EF de la planta influye en la distribución y acumulación de azúcar en los IN de la variedad ROGER (Cuadro 3.2), se procedió a conocer su dinámica (Figura 3.2).

La mayor concentración de °Bx durante la EF6 se observó entre los IN1 y IN4 (Figura 3.2a). Para EF7 los mayores valores se mostraron del IN2 al IN6 (Figura 3.2b). Una vez alcanzada EF8, los mayores valores fueron observados en los IN4 y IN5 (Figura 3.2c). Indicando que después de la antesis el contenido de azúcar en los IN superiores disminuye con la madurez de la planta, contrario a lo observado en los IN intermedios superiores. Esto se observó más detalladamente en el análisis individual de cada IN (Figura 2d). Donde los IN1 (11.59) y IN2 (11.43) tuvieron igual comportamiento ($P>0.05$) en todas las EF de la planta. Ambos IN mostraron el mayor valor de °Bx en EF6, que disminuyeron significativamente en EF7 seguida de una ligera disminución en la EF8. Este comportamiento, podría estar asociado con una alta demanda de carbohidratos por la panoja durante la antesis y así, mayor actividad fotosintética de las hojas cercana a ésta y, por consiguiente, mayor acumulación de °Bx en los IN relacionados (Bihmidine *et al.*, 2015).

Existen reportes que la acumulación de azúcar puede suceder principalmente antes de la antesis, una vez que los primeros IN completan su alargamiento y se incrementa cuando se detiene el crecimiento de las hojas y del tallo. Evitando así la

competencia con el llenado del grano (Gutjahr *et al.*, 2013; McKinley *et al.*, 2016). Sin embargo, este comportamiento puede variar por la demanda de carbohidratos por el grano en desarrollo.

Por otra parte, el IN3 no mostró diferencia ($P>0.05$) en la acumulación de azúcar por EF; para el resto de los IN se observó un incremento con el paso del tiempo. En general el mayor valor de °Bx fue observado en los IN4 y IN5 (intermedios superiores) cuando la planta alcanza un determinado grado de madurez (EF8), mientras que, el menor valor se presentó en los IN de la base del tallo, lo que resulta en un comportamiento similar al observado en otros estudios (Diaz *et al.*, 2016; Morey *et al.*, 2018). Por lo tanto, la acumulación de azúcar por IN depende entre otros factores de su posición en el tallo, del número de IN y sus dimensiones, de la etapa fenológica, así como de la variedad de sorgo dulce (Morey *et al.*, 2018).

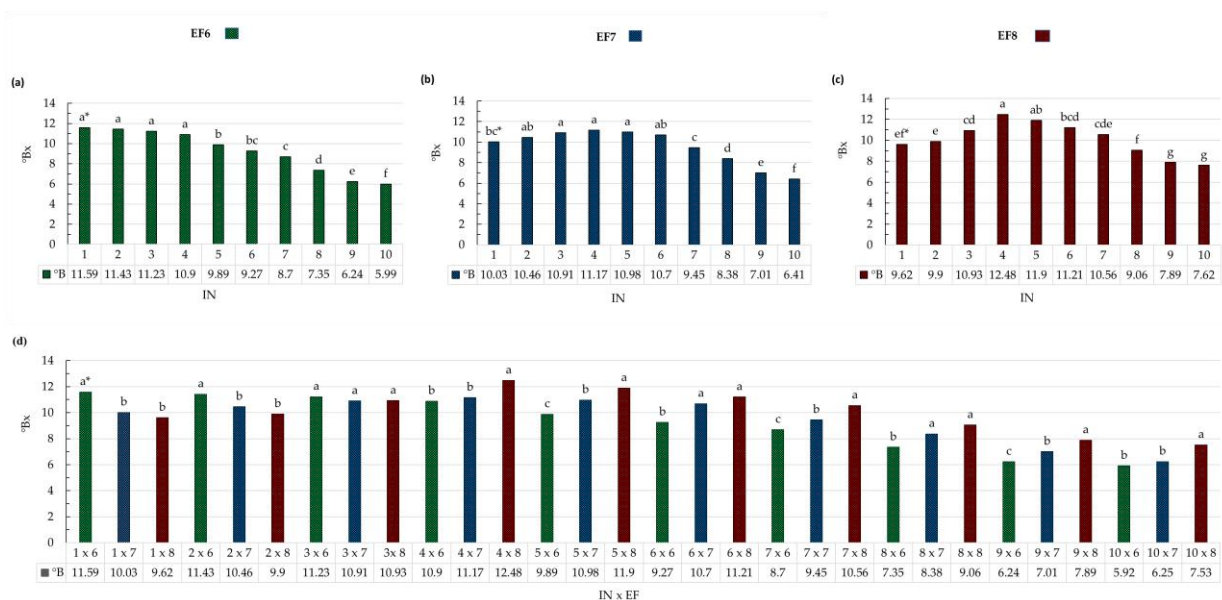


Figura 3.2. Evolución de la concentración de sólidos solubles totales o grados Brix (°Bx) por entrenudos (IN) en las etapas fenológicas (EF) de la planta: (a, b, c) distribución entre IN; (d) acumulación por IN. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P>0.05$).

En algunas variedades de sorgo la acumulación de azúcar se asocia más con la edad del IN, que a la fenología de la planta (Gutjahr *et al.*, 2013). En este sentido, °Bx y IL mostraron una correlación positiva ($P < 0.01$). Por el contrario, ambos parámetros se relacionaron negativamente ($P < 0.01$) con ID (Cuadro 3.3). Lo anterior, sugiere que de manera general la distribución y acumulación de azúcar en los IN del tallo dependen de factores fenológicos de la planta.

Cuadro 3.3. Correlación de Pearson para los parámetros agronómicos medidos por entrenudo.

	°Bx	IL	ID
°Bx	1		
IL	0.249**	1	
ID	-0.316**	-0.204**	1

°Bx= concentración de sólidos solubles totales, grados Brix; IL= longitud del tallo; ID= diámetro del tallo. **, $P < 0.01$ (bilateral).

3.4.3 Longitud y Diámetro de Entrenudo

La mayor longitud del IN1 (39.41 cm) se observó en EF8 (Figura 3.3), este entrenudo tiene la particularidad que corresponde al pedúnculo de la panoja y no es propiamente un entrenudo normal que forme parte del tallo principal. La mayoría de los IN no mostraron diferencia ($P > 0.05$) entre EF para esta característica, solo IN1, IN5, IN6 y IN10. La longitud promedio de IN fue de 21.61 cm. Algunos de estos rasgos fueron similares a lo observado en otras variedades, donde reportan que, el IN más alejado de la base del tallo es el de mayor longitud, promediando 40 cm y un promedio de 22 cm para el resto de los IN (Bihmidine *et al.*, 2015; Tovignan *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2019).

Estos resultados pudieran asociarse al desarrollo del sistema vascular de la planta, que permite su crecimiento durante todo el ciclo de vida formando nuevos tejidos y órganos, resultado de la división celular (Miyashima *et al.*, 2013). Se conoce que, las dimensiones de los IN pueden variar por el efecto de la humedad, la temperatura, el fotoperíodo, la época de plantación y la densidad de siembra (Tsuchihashi y Goto, 2005; Sowiński y Liszka-Brandau, 2018). Esta última puede incrementar la altura de planta resultado de la competencia por luz, agua y nutrientes, induciendo principalmente a un aumento del número de IN o de sus dimensiones (Ayub *et al.*, 2002; Tang *et al.*, 2018).

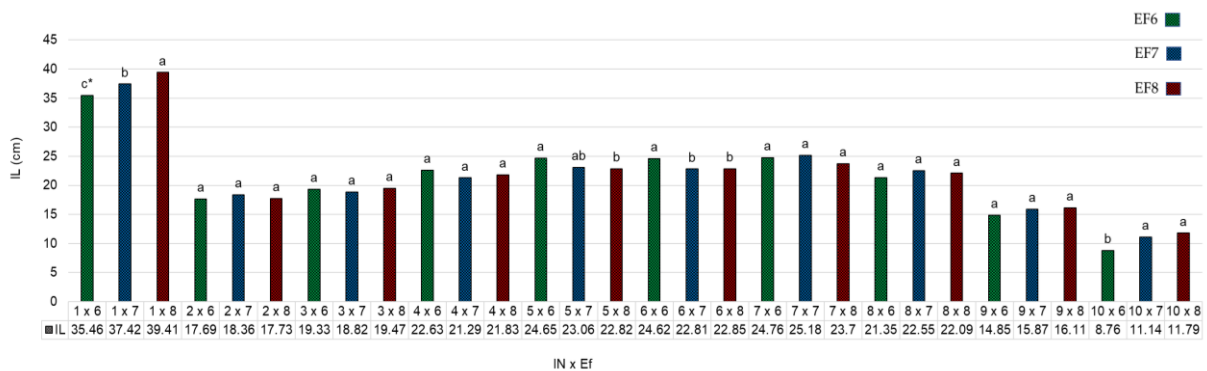


Figura 3.3. Evolución de longitud de entrenudo (IL) por etapa fenológica (EF) de la planta. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P > 0.05$).

El diámetro de los entrenudos no mostró diferencia significativa ($P > 0.05$) entre las EF por el método de producción (Cuadro 3.2); sin embargo, la distribución a lo largo del tallo siguió cierto patrón de comportamiento ($P < 0.01$). La Figura 3.4 muestra que los IN8, IN9 y IN10 (los más cercanos a la base del tallo) tuvieron un mayor diámetro (1.53 cm, 1.52 cm y 1.49 cm, respectivamente), el cual fue disminuyendo en la medida que se aproximaron al ápice del tallo, siendo el IN1 (0.79 cm) el más delgado. Estos

rasgos morfológicos han sido reportados en otros genotipos de sorgo y están asociados principalmente a la función biomecánica del tallo propia de cada variedad (Gomez *et al.*, 2017; Sowiński y Liszka-Brandau, 2018). Lo cual dependerá de la genética y sus efectos en las características morfológicas del tallo (Brulé *et al.*, 2016), condicionadas principalmente por factores ambientales y de producción (Tsuchihashi y Goto, 2005). Asimismo, el número de IN depende de la variedad, la disponibilidad de agua, la etapa de cosecha y la época de siembra (Tsuchihashi y Goto, 2005; Morey *et al.*, 2018). Cabe mencionar que, los valores obtenidos en la variedad ROGER se encuentran en el rango reportado (0.7 cm a 3.13 cm) en otras variedades de sorgo dulce (Tovignan *et al.*, 2016; Mangena *et al.*, 2018, Tang *et al.*, 2018).

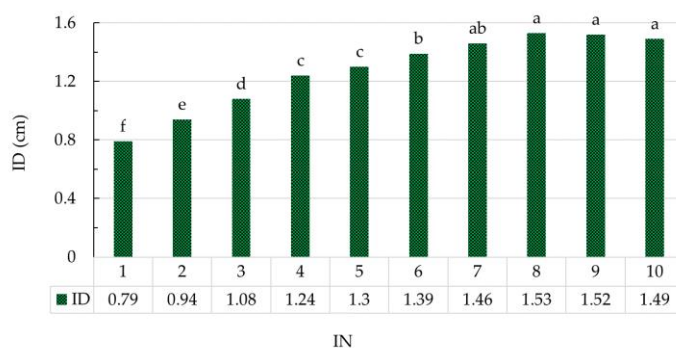


Figura 3.4. Comportamiento del diámetro por entrenado (ID) de la planta. *, Valores de la media con una letra común no son significativamente diferente (LSD Fisher, $P > 0.05$).

3.4.4 Biomasa

En el Cuadro 3.4 se muestra el análisis de varianza para la producción de biomasa, jugo y azúcar. La producción de biomasa mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) únicamente por el efecto de la EF, sin interacción con los demás factores. La comparación de medias (Cuadro 3.5) presentó el mayor RBS a partir de la EF7 (de

18.65 t·ha⁻¹ a 19.01 t·ha⁻¹) con valores que se encuentra en el rango reportado de 8.48 t·ha⁻¹ a 35.2 t·ha⁻¹ en otras variedades de sorgo dulce (Almodares y Sharif, 2007; Zhao *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2018). Así, el mayor aporte a RBS lo tuvo el tallo con el máximo valor en la EF9 (60.04%), semejante a lo mostrado en otras variedades (Zhao *et al.*, 2009) y menor al rango de 63.4% a 76.6% reportado por Pannacci y Bartolini (2016), lo cual podría relacionarse a una menor densidad de siembra en ROGER.

La producción de biomasa también puede variar entre variedades de sorgo dulce y depender entre otros factores, del momento de cosecha, la altura de planta, la humedad del suelo, del método de labranza y el tipo de fertilizante aplicado (Pittelkow *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Olugbemi y Abiola, 2016).

En cuanto a la fertilización, principalmente la nitrogenada, puede incrementar la producción de biomasa, destacando los fertilizantes químicos que llegan a ser más eficiente que los fertilizantes orgánicos. Aunque estos últimos tienen un impacto positivo en las propiedades del suelo, que contribuirán a mejorar el rendimiento de biomasa en posteriores ciclos del cultivo (Ayub *et al.*, 2002; Xuan *et al.*, 2015; Pannacci y Bartolini, 2016). De igual forma, las condiciones climáticas y la fecha de siembra del sorgo pueden influir en la eficiencia de respuesta del cultivo a la fertilización (Snider *et al.*, 2012; Maw *et al.*, 2016; Tovignan *et al.*, 2016).

Cabe mencionar también la importancia que tiene la forma y el número de hojas en la producción de materia seca, ya que determinan la eficiencia de captación de la radiación solar y con ello un desarrollo uniforme de la planta. Así, la duración del área

foliar entre el período de elongación y la antesis puede influir en la producción de biomasa (Vermerris y Saballos, 2013; Tang *et al.*, 2018).

En variedades sensibles al fotoperíodo o de madurez tardía fue observada mayor producción de biomasa, asociada a su acumulación durante toda la temporada de crecimiento (Rooney *et al.*, 2007). De igual forma, se manifiesta en las variedades con tallos altos, gruesos y de muchos IN que pueden cultivarse a una densidad de plantación relativamente alta, sin sufrir acames por su peso, roturas del tallo por la emergencia de la panícula o el impacto de la fuerza del viento (Shoemaker y Bransby, 2010).

Por lo que, la producción de la biomasa puede ser manipulada a través de la genética y de prácticas estándar de manejo de cultivos que incluyen la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas, la resistencia a plagas y enfermedades, así como la susceptibilidad al acame.

3.4.5 Dinámica de Producción de Jugo y Azúcar

La dinámica de producción de jugo y azúcar del tallo presentó diferencia significativa ($P < 0.01$; $P \leq 0.05$) entre EF y en la interacción EF×L (Cuadro 3.4). La EF7 y la interacción EF2×L3 tuvieron los mayores valores de PJ con $119.48 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ y $132.42 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 3.5). Indicando así una relación entre la fenología de la planta y el método de labranza en el contenido de jugo del tallo. Además, se observó que entre la antesis y el inicio del llenado del grano incrementa el PJ.

Cuadro 3.4. Cuadrados medios del análisis de varianza para la producción de biomasa seca, jugo y azúcar del tallo en las etapas fenológica de la planta y en los sistemas de producción.

F.V.	G.L.	CM								
		BSH	BST	BSE	RBS	PJ	°Bx	CEJM	CAJ	CAJN
EF	3	371.86**	375.42**	538.34**	613.78**	1168.52*	134.27**	16.81*	373.35**	252245.57**
EF > R	8	26.42	81.21	66.39	11.77	342.41	10.02	1.96	48.48	11114.18
L	2	0.10 ns	10.90 ns	15.48 ns	13.54 ns	118.59 ns	4.14 ns	6.58 ns	12.59 ns	17099.14 ns
L x EF	6	13.86 ns	18.97 ns	18.68 ns	50.76 ns	1336.27**	2.80 ns	8.99*	38.77*	21621.37*
EF > L x R	16	8.92	17.74	23.86	24.03	250.68	1.63	2.74	6.36	6820.18
F	2	9.85 ns	2.99 ns	3.16 ns	36.02 ns	204.79 ns	0.11 ns	2.94 ns	0.89 ns	15910.92 ns
F x EF	6	3.95 ns	8.78 ns	3.96 ns	44.90 ns	181.36 ns	1.50 ns	0.89 ns	10.80 ns	5863.27 ns
F x L	4	4.06 ns	14.69 ns	7.74 ns	71.57 ns	208.50 ns	1.07 ns	1.17 ns	6.68 ns	5649.03 ns
F x EF x L	12	3.76 ns	12.63 ns	10.63 ns	41.18 ns	135.73 ns	0.78 ns	0.73 ns	3.43 ns	4043.86 ns
Error	48	7.38	7.93	10.63	17.95	337.83	1.32	1.13	12.30	8422.60
C.V.		9.70	5.96	8.16	17.37	16.70	5.94	2.57	20.01	23.28

F.V.= fuente de variación; G.L.= grados de libertad; CM= cuadrados medios; BSH= biomasa seca de hoja; BST= biomasa seca de tallo; BSE= biomasa seca de panoja; RBS= rendimiento de biomasa seca; °Bx= concentración de sólidos solubles totales, grados Brix; PJ= peso de jugo; CEJM= capacidad de extracción del molino; CAJ= contenido de azúcar del jugo; CAJN= concentración de azúcar del jugo; EF= etapa fenológica; R=repeticón; L= labranza; F= fertilización; C.V. = coeficiente de variación. **, P<0.01; *, P≤0.05; ns, P>0.05.

Mientras que, a partir de la etapa de masa y hasta la madurez fisiológica, comienza un descenso gradual de éste, que corresponde a un comportamiento opuesto al observado en híbridos y variedades mejoradas que mostraron mayor PJ en la etapa de madurez (Kumar *et al.*, 2010); sugiriendo que el PJ depende de las características fenológicas propias de cada variedad y su respuesta a las condiciones de producción establecidas (Bihmidine *et al.*, 2015; da Silva *et al.*, 2019).

En este sentido, la variedad ROGER superó los valores reportados de 22.43 g·planta⁻¹ y 23 g·planta⁻¹ para dos variedades cultivadas bajo diferentes dosis de N, superando también el valor medio de 54.73 g reportada para 16 genotipos cultivados en suelo arcilloso-alcalinos con labranza tradicional (Mekdad *et al.*, 2019; Bakhite *et al.*, 2019). Estos últimos reportes se desarrollaron en condiciones similares a las utilizadas en esta investigación bajo el método de labranza tradicional, con excepción

de la operación de arado de subsuelo, lo que sugiere que labranza profunda contribuye a mejora el rendimiento de jugo.

Cuadro 3.5. Comparación de medias para la producción de biomasa seca, jugo y azúcar del tallo en las etapas fenológica de la planta y en los sistemas de producción.

F.V.	BS (%)			RBS (t ha ⁻¹)	PJ (g planta ⁻¹)	°Bx	CEJM (%)	CAJ (g)	CAJN (mg g ⁻¹ PS)
	Hoja	Tallo	Panoja						
EF									
6	34.58 a*	47.44 c	17.98 b	16.20 b	108.80 b	9.57 b	42.21 b	15.99 b	313.87 c
7	22.44 b	52.67 b	24.89 a	18.65 a	119.48 a	9.93 b	44.95 a	16.77 b	402.35 b
8	23.18 b	53.44 b	23.38 a	18.95 a	107.81 b	10.05 b	42.84 b	14.44 b	332.97 bc
9	15.16 c	60.04 a	24.83 a	19.01 a	104.19 b	14.89 a	44.72 a	22.91 a	527.46 a
Media	23.84	53.39	22.77	18.20	110.07	11.13	43.68	17.53	394.16
DMS (0.05)	3.47	5.64	5.81	0.99	11.48	1.15	1.52	2.65	65.33
EF x L									
1 x 1	28.44	48.22	23.34	15.62	112.87 bcd	17.80	41.08 bcde	16.03 de	336.57 ef
1 x 2	29.01	50.30	20.69	17.04	102.34 cdef	18.48	39.86 de	16.43 d	309.40 ef
1 x 3	31.24	49.49	19.17	16.36	111.19 bcde	17.44	40.6 cde	15.52 def	295.62 f
2 x 1	27.36	47.39	25.25	20.20	113.48 bcd	17.79	41.76 abc	15.81 def	378.39 de
2 x 2	29.66	44.08	26.26	17.64	112.53 bcd	17.88	41.42 bcd	17.22 cd	391.87 de
2 x 3	28.47	48.18	23.35	18.58	132.42 a	18.86	43.11 a	17.28 cd	436.79 bcd
3 x 1	30.51	42.02	27.47	19.16	94.11 f	18.44	39.63 e	13.44 f	277.60 f
3 x 2	28.96	42.79	28.25	19.12	98.64 def	18.83	40.46 cde	13.74 ef	292.82 f
3 x 3	28.83	42.17	29.00	19.06	119.80 ab	18.86	42.54 ab	16.13 de	428.47 cd
4 x 1	26.45	49.37	24.18	19.23	95.58 ef	21.95	41.84 abc	19.11 c	479.45 bc
4 x 2	26.55	51.51	21.94	19.35	113.21 bcd	22.47	41.49 abcd	23.19 b	514.96 ab
4 x 3	27.04	51.53	21.43	20.02	114.65 bc	23.60	42.57 ab	26.44 a	587.97 a
Media	29.04	47.25	23.71	18.44	110.09	19.37	41.36	17.53	394.15
DMS (0.05)	2.98	4.21	4.88	4.72	15.82	1.28	1.65	2.52	82.53

F.V.= fuente de variación; BS= biomasa seca; RBS= rendimiento de biomasa seca; °Bx= concentración de sólidos solubles totales, grados Brix; PJ= peso de jugo; CEJM= capacidad de extracción del molino; CAJ= contenido de azúcar del jugo; CAJN= concentración de azúcar del jugo. EF= etapa fenológica; L= labranza. *, Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (LSD Fisher, P≤0.05).

Por otra parte, PJ se correlacionó positivamente (P<0.01) con CEJM (Cuadro 3.6), indicando que PJ está asociado con CEJM. Así, el mayor valor de CEJM (Cuadro 3.5) se observó en EF7 (44.95%) y en la interacción EF2xT3 (43.11%), aunque EF7 fue estadísticamente (P>0.05) igual a EF9 (44.72%).

Lo anterior sugiere que, CEJM al igual que PJ dependen de las condiciones de producción del cultivo y, por lo tanto, de características del tallo, principalmente del

contenido de jugo (Tsuchihashi y Goto, 2005). No obstante, los valores obtenidos de CEJM se encuentran en el rango de 39.8% a 45.7% reportado por Rono et al. (2018) y supera los valores de 39.02% y 39.20% mencionados por Mekdad et al. (2019).

Con respecto a la producción de azúcar, °Bx mostró un incremento con el avance de EF (Cuadro 3.5), alcanzando el mayor valor en la EF9 (14.89), similar a lo observado en otras variedades (Oyier *et al.*, 2017). Para esta característica se ha reportado un amplio rango de 3.3 a 18.9, que dependerá de la variedad y de EF (Kumar *et al.*, 2010; Bihmidine *et al.*, 2015; Cole *et al.*, 2017). °Bx se correlacionó positivamente ($P < 0.01$) con BST, BSE, CAJ y CAJN (Cuadro 3.6). Así, CAJ y CAJN mostraron los máximos valores en la EF9 con 22.91 g y 527.46 mg·g⁻¹ PS, respectivamente. CAJ y CAJN mostraron variación ($P < 0.01$) en la interacción EF×L. Donde, EF4×L3 mostró los mayores valores con 26.44 g y 587.97 mg·g⁻¹ PS, respectivamente.

Cuadro 3.6. Correlación de Pearson para la producción de biomasa seca, jugo y azúcar.

	BSH	BST	BSE	PJ	°Bx	CEJM	CAJ
BSH	1						
BST	-0.492**	1					
BSE	-0.234*	-0.732**	1				
PJ	-0.019	0.145	-0.147	1			
°Bx	-0.652**	0.279**	0.199*	-0.05	1		
CEJM	-0.299**	0.192*	0.02	0.714**	0.09	1	
CAJ	-0.492**	0.356**	-0.012	0.479**	0.817**	0.342**	1
CAJN	-0.569**	0.296**	0.115	0.465**	0.656**	0.738**	0.742**

BSH= biomasa seca de hoja; BST= biomasa seca de tallo; BSE= biomasa seca de panoja; °Bx= concentración de sólidos solubles totales, grados Brix; PJ= peso de jugo; CEJM= capacidad de extracción del molino; CAJ= contenido de azúcar del jugo; CAJN= concentración de azúcar del jugo. **, $P < 0.01$ (bilateral); *, $P \leq 0.05$ (bilateral).

Por otra parte, CAJ y CAJN tuvieron una correlación positivamente ($P < 0.01$), al igual con PJ y BST (Cuadro 3.6). Lo cual coincide con otros estudios que han

considerado la jugosidad del tallo necesaria para la acumulación de azúcar, mostrando variaciones asociadas con la proporción de biomasa de la planta (Mizuno *et al.*, 2016; Tovignan *et al.*, 2016; Morey *et al.*, 2018).

En este trabajo, los resultados obtenidos de CAJ fueron menores al rango de 27 g a 61 g reportado para variedades nativas de África. Mientras que, CAJN se encuentra en el rango de 482 mg·g⁻¹ PS a 589 mg·g⁻¹ PS para estas mismas variedades (Tovigna *et al.*, 2016). Tanto, °Bx como CAJ y CAJN pueden aumentar significativamente desde la antesis hasta la madurez fisiológica de las plantas, alcanzando valores considerablemente superiores a los del sorgo de grano (Bihmidine *et al.*, 2015), por lo que, el grado de madurez de la planta y las condiciones de producción son determinantes en la acumulación de azúcar en el tallo.

Algunos autores mencionan que la época y fecha de siembra también influyen en la acumulación de azúcar en el tallo del sorgo dulce (Tsuchihashi y Goto, 2005; Tovigna *et al.*, 2016; Pabendon *et al.*, 2017), tal como sucede con las variaciones de humedad, temperaturas, fertilidad del suelo y la calidad del agua de riego (Almodares y Sharif, 2007; Tovignan *et al.*, 2016; Rolz *et al.*, 2017).

En general, si bien los tratamientos de labranza y fertilización no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$) en los parámetros estudiados, es importante mencionar que bajo otras condiciones de producción han sido determinantes en los rendimientos agronómicos del sorgo dulce (Diaz *et al.*, 2016; Zhai *et al.*, 2017; Roy *et al.*, 2018; Nokerbekova *et al.*, 2018).

3.5 Conclusiones

Los resultados indicaron que la producción de azúcar y biomasa seca de la variedad de sorgo dulce ROGER dependen de la etapa fenológica de la planta. Además de ésta, la distribución y acumulación de azúcar por entrenudos del tallo se asoció con componentes fenológicos de la planta (longitud y diámetro del entrenudo).

Por otra parte, la acumulación de azúcar y biomasa de la planta incrementó con la madurez fisiológica. En consecuencia, los mayores valores de °Bx (14.89), CAJ (22.91 g), CAJN (527.46 mg·g⁻¹ PS), BS (60.04%) y RBS (19.01 t·ha⁻¹) fueron observados en EF9. Bajo las condiciones de producción de este estudio no tuvo efecto significativo sobre los parámetros agronómicos evaluados la acción de los diferentes métodos de labranza y tipos de fertilizantes. Sin embargo, nuestros resultados pueden contribuir a la validar la producción de la variedad de sorgo dulce ROGER en zonas del estado de Nuevo León.

Esta práctica tendrá un valioso impacto en la productividad del material vegetal y en su inclusión en otros sitios de interés. Por lo que, en próximas investigaciones serán analizados otros factores que puedan ayudar a incrementar los rendimientos agronómicos de la variedad para su potencial aplicación en la producción de bioetanol.

CAPÍTULO 4: RENDIMIENTO DE BIOETANOL DEL JUGO DE LA VARIEDAD DE SORGO DULCE ROGER

Fecha de envío: 15 de junio de 2020 (Apéndice 3)

4.1 Resumen

El sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un cultivo promisorio en la producción de bioetanol por sus altas cantidades de jugo, biomasa y contenido de azúcares fermentables. Así como, por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones productivas y a la fácil extracción de los jugos del tallo. El objetivo de este trabajo fue determinar el sistema de producción de la variedad de sorgo dulce ROGER con mayor rendimiento de bioetanol. Los sistemas consistieron en la combinación de diferentes labranzas y tipos de fertilizantes. Los resultados mostraron que los mayores valores de rendimiento de tallo ($44.29 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), jugo ($25.56 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), grados Brix (16.92) y etanol ($2.12 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) fueron obtenidos bajo la combinación de la labranza tradicional con penetración profunda y el fertilizante orgánico. Además, el jugo permitió el desarrollo de la levadura sin la necesidad de suplementación o adición de nutrientes.

4.2 Introducción

Con el tiempo el bioetanol ha ganado valor ante otros biocombustibles. Siendo el más utilizado en mezclas reguladas con gasolina y, por tanto, una fuente viable de energía alterna que contribuye a reducir el consumo de combustibles fósiles y, por consiguiente, la emisión de contaminantes a la atmosfera (Xuan *et al.*, 2015; Azhar *et al.*, 2017).

El bioetanol puede ser obtenido de diferentes materias primas, en particular de las que contienen azúcar y se clasifican como bioetanol de primera generación, los cuales derivan mayormente de cultivos agrícolas destinado a la alimentación, entre los cuales podemos mencionar, caña de azúcar, maíz, sorgo, cebada, trigo y yuca. Por otra parte, la segunda y tercera generación bioetanol se obtiene de materiales lignocelulósico y de biomasa de algas, respectivamente (Baeyens *et al.*, 2015). Sin embargo, la producción de primera generación es más económica, ya que los jugos presentan azúcares fermentables disponibles sin la necesidad de un pretratamiento previo (Zabed *et al.*, 2014).

En la obtención de bioetanol de primera generación un cultivo promisorio es el sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], una planta C₄ de ciclo corto de alta producción de biomasa y azúcar con baja demanda de insumos y agua, que le permite su adaptación en tierras marginales y propensas a la sequía. Además, tiene la capacidad de producir combustible sin afectar el suministro de alimento, contribuyendo a mitigar el conflicto de seguridad alimentaria (Khalil *et al.*, 2015; Pabendon *et al.*,

2017). Considerado el quinto cultivo de cereal más importante del mundo y el sustento alimenticio de millones de personas, principalmente en países en vías de desarrollo (Mar *et al.*, 2019). La Figura 4.1 muestra el proceso convencional de producción de bioetanol de primera generación.

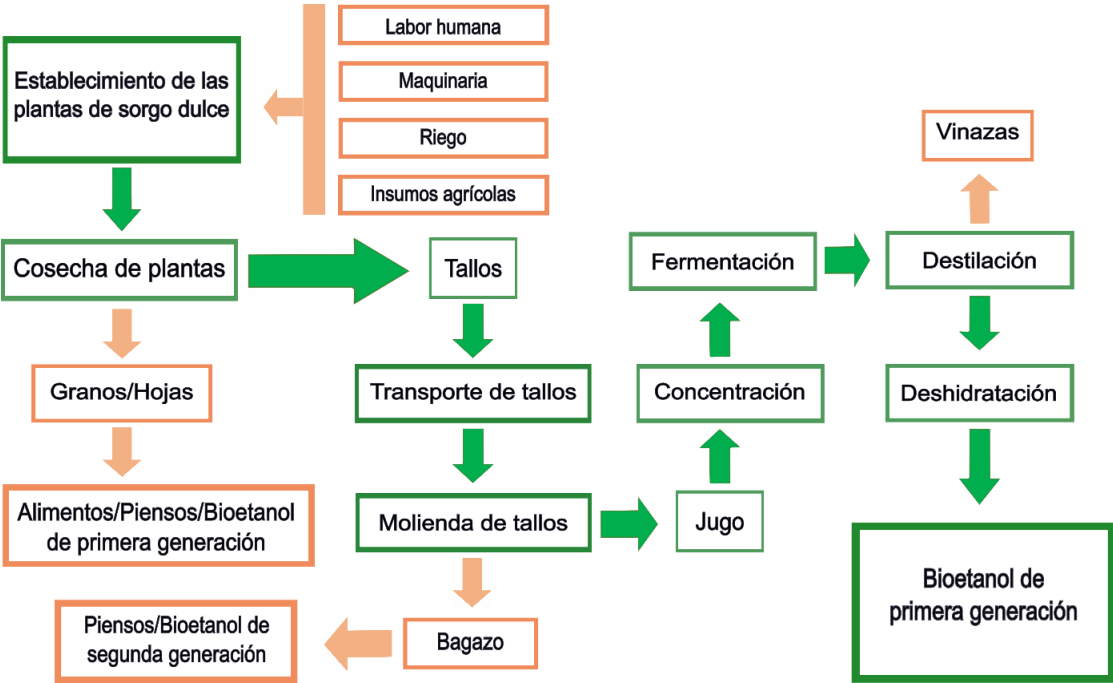


Figura 4.1. Diagrama del proceso convencional para la obtención de bioetanol de primera generación de sorgo dulce.

Las potencialidades del sorgo dulce han contribuido al desarrollo de nuevas variedades en la obtención de bioetanol. El rendimiento de bioetanol de primera generación depende entre otros factores de la acumulación de jugo y azúcar en el tallo, los cuales varían entre variedades, condiciones de producción (Pabendon *et al.*, 2017; Cole *et al.*, 2017; Maw *et al.*, 2019) y manejo postcosecha del material vegetal (Rao *et al.*, 2013). Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar el sistema

de producción de la variedad de sorgo dulce ROGER con mayor rendimiento de bioetanol.

4.3 Materiales y Métodos

4.3.1 Material Vegetal

Los jugos utilizados en la producción de bioetanol proceden de la variedad de sorgo dulce ROGER establecida bajo diferentes tratamientos agronómicos mostrados en el Cuadro 4.1. Los tratamientos fueron establecidos bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglos en parcelas divididas con tres repeticiones. La variedad está registrada en el Catálogo de Variedades Vegetales de la SAGARPA con la clave SOG - 261 – 050315. La producción del material vegetal se realizó en el campo experimental Marín perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Geográficamente se ubica a 25° 52′ 13,5″ latitud norte y 100° 02′ 22,56″ longitud oeste, con una altitud de 355 msnm. El clima corresponde a un BS₁ (h´) hw (e´), descrito como seco estepario cálido con lluvias en verano, precipitaciones anuales que fluctúan entre 250-500 mm y temperatura media anual de 22 °C. El suelo predominante del área es vertisoles, delgados, compactados, con altos contenidos de arcilla y carbonato de calcio, bajos contenidos de materia orgánica y pH entre 7.5- 8.5 (Williams-Alanís *et al.*, 2017). En estas condiciones y con una densidad de siembra de 18 plantas/m², la variedad se caracteriza por un promedio de 75 días para la floración, 2.4 m de altura de la planta, 45 t·ha⁻¹ de biomasa fresca y un ciclo de cultivo de 130 días.

Cuadro 4.1. Composición y especificaciones de los tratamientos agronómicos.

Tx	Composición
1	T1 + F1
2	T1 + F2
3	T1 + F3
4	T2 + F1
5	T2 + F2
6	T2 + F3
7	T3 + F1
8	T3 + F2
9	T3 + F3

Tx= tratamiento; T1= labranza mínima, que incluyó las labores de desbroce y rastra (hasta 0.20 m de profundidad); T2= labranza tradicional, que incluyó las labores de desbroce, arado y rastra (hasta 0.30 m de profundidad); T3= labranza tradicional con penetración profunda, que incluyó las labores de desbroce, arado de subsuelo, arado y rastra (hasta 0.75 m de profundidad); F1= fertilizante orgánico con dosis de 3 t·ha⁻¹ de estiércol de pollo (N: 60 kg·ha⁻¹; P: 65 kg·ha⁻¹; K: 75 kg·ha⁻¹); F2= fertilizante inorgánico (N: 100 kg·ha⁻¹, P: 50 kg·ha⁻¹); F3= sin fertilizantes.

4.3.2 Obtención del Jugo

Para la obtención de los jugos fueron molidos 200 tallos por tratamiento en un molino de caña de azúcar. Los jugos obtenidos fueron tamizados para medir el contenido de sólidos solubles totales (°Bx), el peso de jugo (PJ) y el volumen de jugo (VJ). Los °Bx fueron medidos con un refractómetro portátil digital (ATAGO® 3810, PAL-1, Atago USA Inc., Bellevue, USA); así mismo, fue estimada la pérdida de °Bx por el tiempo transcurrido entre la extracción de los jugos y la fermentación. La eficiencia de extracción de jugo (EEJ) del molino fue determinada de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Adewole *et al.*, 2015; Olaoye, 2011):

$$EEJ (\%) = \frac{PJ}{PTJ} \times 100 \quad (1)$$

Donde PJ (kg) es el peso del jugo extraído y PTJ (kg) es el peso total de jugo contenido en el tallo que fue determinado por la siguiente ecuación:

$$PTJ (kg) = PFT - PSB \quad (2)$$

Donde PFT (kg) es el peso fresco de la muestra obtenida del tallo y PSB (kg) es el peso seco del bagazo obtenido después de la molienda del tallo, secado en una estufa de aire forzado (HAFO® serie 1600, USA) a 65 °C hasta alcanzar un peso constante.

El contenido de humedad del bagazo (CHB) fue determinado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$CHB (\%) = \frac{PFB - PSB}{PFB} \times 100 \quad (3)$$

Donde PFB (kg) es el peso fresco del bagazo obtenido de molienda del tallo.

4.3.3 Preparación de Inoculo

La cepa *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 utilizada fue proporcionada por el Dr. Héctor Ruiz Leza del grupo de Biorrefinería de la Facultad de Ciencias Químicas en la Universidad Autónoma de Coahuila, México. Se mantuvo en medio PDA (Agar papa dextrosa) por resiembras periódicas cada tres meses y almacenada a 4 °C. El inoculo se preparó en un medio PDB (Caldo papa dextrosa), previamente esterilizado a 121 °C por 15 min. Previo a cada ensayo los cultivos fueron incubados a 30 °C y agitados a 150 rpm por 24 h.

4.3.4 Producción de Bioetanol

En matraces Erlenmeyer de 500 mL fueron colocados 200 mL de los jugos y fueron esterilizados a 121 °C durante 20 min. Los medios de cultivo fueron inoculados al 2% (v/v) e incubados por 72 h a 30 °C en condiciones de agitación a 150 rpm en un agitador incubador (New Brunswick Scientific Co. G 25 Inc., Edison, NJ. USA). Los cambios de pH, °Bx, concentración de azúcares reductores (AR), producción de biomasa (PB) y la concentración de bioetanol (CEJ) fueron determinados a las 0, 24, 48 y 72 h de fermentación. Todos los ensayos fueron realizados por triplicado.

La medición del pH fue realizada con un potenciómetro (Corning® pH meter 430, USA). La cuantificación de AR fue realizada por el método descrito por Miller (1959), utilizando glucosa como estándar. Se tomaron muestras del caldo de fermentación y fueron centrifugadas a 14 000 rpm durante 10 min. Posteriormente, fue tomado 0.1 mL del sobrenadante y se adicionó 0.1 mL de ácido dinitrosalicílico (DNS). Las reacciones fueron hervidas durante 5 min a 100 °C y luego sumergidas en un baño con hielo por 5 min. Finalmente se agregó 1 mL de agua bidestilada. Las lecturas se realizaron a 540 nm en un espectro (Shimadzu® UV-Vis 1800, Japón).

Los cultivos fueron filtrados a través de filtros Whatman N° 1 (previamente pesados) para calcular la PB y recuperar lo sobrenadantes para la cuantificación de bioetanol. Los filtros con la biomasa recuperada fueron colocados en una estufa (HAFO® serie 1600, USA) a 60 °C hasta alcanzar un peso constante. Para estimar el rendimiento de etanol del jugo (REJ) fueron tomados 100 mL de los sobrenadantes y

colocados en un rotavapor (IKA® RV 10 Digital, China) a 30 °C, 132 mbar y 50 rpm por período de 40 min.

El destilado obtenido del rotavapor se usó para determinar CEJ (p/v) por el método de dicromato de potasio (Crowell y Ough, 1979; Khalil *et al.*, 2015). La eficiencia de fermentación (EFE) y la productividad volumétrica de etanol (PVE) fueron determinadas de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Appiah-Nkansah *et al.*, 2018; Laopaiboon *et al.*, 2007):

$$EFE (\%) = \frac{REJ}{RTEJ} \times 100 \quad (4)$$

Donde REJ ($m^3 \cdot ha^{-1}$) es el rendimiento de etanol del jugo (ecuación 6) y RTEJ ($m^3 \cdot ha^{-1}$) es rendimiento teórico de etanol del jugo (ecuación 7).

$$PVE (g/L/h) = \frac{CEJ}{t} \quad (5)$$

Donde CEJ ($g \cdot L^{-1}$) es la concentración de etanol del jugo y t (h) es el tiempo de fermentación que proporciona la mayor concentración de etanol para fermentaciones discontinuas.

El rendimiento de etanol del jugo (REJ) fue determinado de acuerdo con la siguiente ecuación (Rono *et al.*, 2018):

$$REJ (m^3 \cdot ha^{-1}) = \frac{VE}{VJ} \times JY \quad (6)$$

Donde: VE (m³) es el volumen de etanol, VJ (m³) es el volumen de jugo y RJ (m³·ha⁻¹) es el rendimiento de jugo.

4.3.5 Producción Teórica de Bioetanol

El rendimiento teórico de etanol fue determinado utilizando la metodología descritas por Yang et al. (2018), basadas en la tecnología de fermentación avanzada de estado sólido (ASSF) reportada por Li et al. (2013). El rendimiento teórico de etanol del jugo (RTEJ) fue determinado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RTEJ (m^3 \cdot ha^{-1}) = 0.07911 \times RTF \quad (7)$$

Donde 0.07911 (L·t⁻¹) es el factor de conversión del jugo a etanol combustible y RTF (t·ha⁻¹) es el rendimiento de tallo fresco.

El rendimiento teórico de etanol del grano (RTEG) fue determinado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RTEG (m^3 \cdot ha^{-1}) = 0.43038 \times RG \quad (8)$$

Donde 0.43038 (L·t⁻¹) es el factor de conversión del grano a etanol combustible y RG (t/ha) es el rendimiento de grano.

El rendimiento teórico de etanol total (RTET) fue determinado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$RTET (m^3 \cdot ha^{-1}) = RTEJ + RTEG \quad (9)$$

4.3.6 Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados en el software estadístico IBM SPSS Statistics para Windows. La diferencia mínima significativa se determinó mediante un análisis de varianza (ANOVA, $p \leq 0.05$). Los resultados fueron expresados como los valores medios \pm DE. Para la separación de medias y el análisis de correlación fue utilizada la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) y el coeficiente de Pearson ($P \leq 0.05$), respectivamente.

4.4 Resultado y Discusión.

4.4.1 Peso Fresco de Tallo, Rendimiento de Tallo Fresco, Contenido de Humedad del Bagazo y Eficiencia de Extracción de Jugo

Los resultados de la comparación de medias (Cuadro 4.2) revelaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre tratamientos para PFT, RTF y CHB, no así para EEJ ($P > 0.05$). El mayor valor de PFT (246.04 g/planta) y RTF (44.29 t·ha⁻¹) se observó en T7, lo cual indica una alta efectividad del tratamiento que favorece las condiciones de producción de la variedad, con ello se incrementan los rendimientos en un rango de 2.31 a 11.77 t·ha⁻¹. Además, de superar los valores obtenidos en otras variedades de sorgo dulce con reportes de 27.4 y 18.17 t·ha⁻¹ (Rono *et al.*, 2018; Yoosukyingsataporn y Detpiratmongkol, 2019). Aunque, estos últimos autores reportan un mayor PFT con 677.76 g·planta⁻¹, lo que sugiere que su variación depende de las condiciones de producción (densidad de plantación, labranza y fertilización). Los resultados indicaron

una relación directa entre CHB y EEJ que se evidenció con su alta correlación ($P < 0.01$) negativa (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.2. Comparación de medias para el peso fresco del tallo, el contenido de humedad del bagazo y la eficiencia de extracción del jugo.

Tx	PFT	RTF	CHB	EEJ
	(g/planta ⁻¹)	(t/ha ⁻¹)	(%)	
1	202.37 ±24.98 d*	36.43 ±4.50 d	39.33 ±3.97 a	33.15 ±2.60
2	180.67 ±9.11 e	32.52 ±1.64 e	30.73 ±2.61 bc	36.27 ±5.74
3	182.74 ±28.96 e	32.89 ±5.21 e	26.87 ±10.84 cd	33.09 ±6.67
4	220.48 ±15.7 bc	39.69 ±2.83 bc	21.91 ±8.81 d	38.21 ±5.68
5	213.03 ±7.04 cd	38.34 ±1.27 cd	32.15 ±7.93 bc	34.70 ±2.69
6	206.98 ±7.79 cd	37.26 ±1.40 cd	35.61 ±4.67 ab	33.46 ±7.46
7	246.04 ±27.98 a	44.29 ±5.03 a	20.51 ±5.25 d	40.21 ±6.55
8	233.21 ±6.87 ab	41.28 ±1.23 ab	26.84 ±4.39 cd	36.32 ±2.45
9	217.06 ±7.63 bcd	39.02 ±1.37 bcd	36.89 ±8.06 ab	28.25 ±6.70
Media	211.40 ±25.29	38.05 ±4.54	30.09 ±8.48	34.85 ±5.66
P- value	0.004	0.004	0.032	0.362

Tx= tratamiento; PFT= peso fresco del tallo; RTF= rendimiento de tallo fresco; CHB= contenido de humedad del bagazo; EEJ= eficiencia de extracción de jugo del molino. *, Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuadro 4.3. Coeficiente de correlación y probabilidad entre los parámetros de obtención del jugo.

	PFT	CHB	EEJ	PJ	VJ	°Bx
PFT	1					
CHB	-0.14	1				
EEJ	0.02	-0.84**	1			
PJ	0.78**	-0.75**	0.72**	1		
VJ	0.69**	-0.47*	0.66**	0.93**	1	
°Bx	0.73**	-0.08	0.15	0.61**	0.35	1

PFT= peso fresco del tallo; EEJ= eficiencia de extracción de jugo por el molino; CHB: contenido de humedad del bagazo; PJ= peso de jugo; VJ= volumen de jugo; °Bx= grados Brix o contenido de sólidos solubles totales. **, $P < 0.01$ (bilateral). *, $P \leq 0.05$ (bilateral).

El menor valor de CHB (20.51%) se observó en T7 (estadísticamente igual a T4, Cuadro 4.2) y, consecuente, este mismo tratamiento mostró el mayor valor de EEJ (40.21%). Estos parámetros están directamente ligados con la pérdida de jugo durante la molienda. Así, CHB tuvo una correlación ($P \leq 0.05$) negativa con PJ y VJ (Cuadro

4.3). Mientras que, EEJ se correlacionó ($P < 0.01$) positivamente con PJ y VJ indicando que el incremento de EEJ disminuye las pérdidas de jugo y aumenta sus rendimientos.

Las oscilaciones entre tratamientos podrían atribuirse al efecto específico de cada método de producción sobre la planta de sorgo, variando así el contenido de jugo y de fibras del tallo (Rajendran *et al.*, 2000) y la EEJ. Esto sugiere que un alto contenido de fibra puede disminuir la EEJ tal como lo reporta Gnansounou *et al.* (2005). En este sentido, el promedio de EEJ (34.85%) fue menor al rango de 38.91 a 45.7% reportado en otras variedades de sorgo dulce (Rono *et al.*, 2018; Mekdad y Emam, 2019), sugiriendo una baja EEJ del molino y, por consiguiente, una desventaja en el proceso de obtención del jugo.

4.4.2 Peso de Jugo, Volumen de Jugo y Grados Brix

El PJ, VJ, RJ y °Bx mostraron diferencia significativa ($P < 0.01$; $P \leq 0.05$) entre tratamientos (Cuadro 4.4). El máximo valor de PJ ($146.09 \text{ g} \cdot \text{planta}^{-1}$), VJ ($25.56 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) y °Bx (16.65) fue observado en T7. Donde, PJ y °Bx presentaron una alta correlación positiva ($P < 0.01$), no así, entre VJ y °Bx ($P > 0.05$; Cuadro 4.3). La relación que tuvo PJ y VJ con PFT, CHB y EEJ fue consistente con la obtenida por Shukla *et al.* (2017) y Rono *et al.* (2018). Los °Bx se correlacionaron positivamente ($P < 0.01$) con PFT (Cuadro 4.3), coincidiendo con lo reportado por Mekdad y Emam (2019).

Mientras que Shukla *et al.* (2017) y Rono *et al.* (2018) no observaron correlación entre éstos. Los primeros autores describen un comportamiento similar a ROGER (>70 días para la floración) en plantas de sorgo dulce con floración temprana (<70 días para

la floración), indicando que estos parámetros podrían estar asociado con el ciclo de la planta.

Cuadro 4.4. Comparación de medias para peso de jugo del tallo, volumen de jugo del tallo y sólidos solubles totales por tratamiento de producción.

Tx	PJ (g/planta)	VJ (mL/planta)	RJ (m ³ /ha)	°Bx
1	104.56 ±19.79 cde*	111.13 ±19.33 bcd	20.03 ±3.47 bcd	13.87 ±1.53 de
2	102.55 ±1.61 cde	92.14 ±5.06 efg	16.59 ±0.91 efg	14.95 ±1.64 bc
3	92.04 ±17.41 e	84.82 ±11.01 g	15.27 ±1.98 g	13.20 ±1.13 e
4	125.46 ±11.38 b	122.39 ±13.24 b	22.03 ±2.36 b	14.5 ±0.72 cd
5	112.58 ±5.91 bc	103.81 ±8.72 cde	18.69 ±1.57 cde	15.17 ±1.70 bc
6	106.76 ±18.52 cd	99.39 ±20.06 def	17.89 ±3.77 def	14.18 ±0.33 cde
7	146.09 ±2.10 a	141.98 ±3.96 a	25.56 ±0.72 a	16.92 ±0.67 a
8	120.86 ±4.06 b	116.09 ±4.86 bc	20.91 ±0.88 bc	15.75 ±0.60 b
9	97.85 ±21.08 de	88.32 ±14.15 fg	15.9 ±4.34 fg	15.72 ±1.94 b
Media	112.08 ±19.53	106.67 ±21.24	19.20 ±3.82	14.91 ±1.41
P- value	0.004	0.002	0.002	0.017

Tx= tratamiento; PJ= peso de jugo; VJ= volumen de jugo; RJ= rendimiento del jugo; °Bx= grados Brix o contenido de sólidos solubles totales. *, Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey, P≤0.05).

Por otro lado, ha sido recomendada la trituración de los tallos eliminando únicamente la panícula. Ayudando a reducir los tiempos de cosecha y así, el deterioro de los azúcares del tallo en condiciones ambientales del campo, ya que, el sorgo dulce a diferencia de otros cultivos como la caña de azúcar, es tardada la eliminación de la hoja y de la vaina (Rao *et al.*, 2013), aunque se pudiera considerar dejar la vaina en el tallo y eliminar únicamente la lámina de la hoja.

Comparado con otras variedades de sorgo dulce, los resultados de PJ están en el rango reportado de 32.7 a 299.7 g·planta⁻¹ (Bandara *et al.*, 2019) y superan el rango reportado Bakhite *et al.* (2019) de 3.10 a 54.73 g·planta⁻¹. Asimismo, RJ es mayor a los valores obtenidos por da Silva *et al.* (2019) y Maw *et al.* (2019) de 12.01 m³·ha⁻¹ y

15.498 m³·ha⁻¹, respectivamente. En cuanto a °Bx, se encuentran en el rango reportado de 6.66 a 18.5 (Bandara *et al.*, 2019; Bakhite *et al.*, 2019). De igual forma, la variedad ROGER es consistente con otras variedades cultivadas en diferentes ambientes tropicales de México, con reportes de RJ y °Bx de 26.2 m³·ha⁻¹ y 17, respectivamente (Montes-García *et al.*, 2019).

En general, la máxima productividad fue obtenida con T7, lo cual podría ser explicado por la influencia de la labranza y del fertilizante en el cultivo (Mekdad y Emam, 2019, Han y Alison, 2020). En este sentido, la operación de arado de subsuelo permite romper el piso de arado formado por el pase continuo de maquinaria sobre suelo, disminuyendo así, la densidad aparente y la resistencia a la penetración. Lo que aumenta el grado de infiltración de agua, su almacenamiento en las capas profundas y la capacidad fotosintética de las plantas (Zhai *et al.*, 2017).

Se recomienda una operación de la labranza profunda al principio del ciclo de cultivo para disminuir la resistencia a la penetración del suelo y conservar su humedad, promoviendo un mayor desarrollo de las raíces y área de exploración, además de incrementar la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, resultando en mayor crecimiento y capacidad de adaptación en diferentes condiciones de terrenos (Varsa *et al.*, 1997; Busscher *et al.*, 2000; Botta *et al.*, 2006; Janeth *et al.*, 2019).

Por otra parte, se conoce que el sorgo dulce tiene una baja demanda de nitrógeno que pudiera ser suministrada a través de la rotación del cultivo con leguminosas, sin afectar sus rendimientos (Thivierge *et al.*, 2015; Han y Alison, 2020). Asimismo, han

sido reportadas diferencias en las respuestas de las plantas a diferentes dosis de nitrógeno (Holou y Stevens, 2012; Maw *et al.*, 2019).

En cuanto al fertilizante orgánico, éste puede incrementar la acumulación de carbono estable en las capas superficiales del suelo, las concentraciones y las proporciones de carbono lábil, además de mejorar la agregación y el reaprovechamiento de nutrientes en el suelo (Li *et al.*, 2018; Ghosh *et al.*, 2018). Así, los fertilizantes orgánicos tienen la capacidad de impactar positivamente en las propiedades del suelo, aumentando la cantidad y disponibilidad de nutrientes y la retención de agua (Karuku *et al.*, 2018; Janeth *et al.*, 2019).

4.4.3 Grados Brix en Función del Tiempo Transcurrido después de la Extracción del Jugo

El tiempo de traslado ($\approx 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 12 h) y almacenamiento ($\approx -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h) de los jugos después de la molienda de los tallos y hasta su fermentación, redujo los $^{\circ}\text{Bx}$ en un rango de 3.79 a 13.48 con respecto al porcentaje original. Sugiriendo que, los jugos tienen alta capacidad de fermentación sin la adición de enzimas (Ebrahimiaqda y Ogden, 2018). Los reportes indican que después de la molienda el jugo puede conservarse sin descomponerse entre 4 ó 5 horas a temperatura ambiente (Kumar *et al.*, 2015), debido al alto contenido de azúcares fermentables y su rápida degradación por las actividades metabólicas de las bacterias contaminantes (Kumar *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2010).

Asimismo, el método de producción del sorgo puede influir en el grado de descomposición del jugo, perdiendo hasta un 20% de los azúcares fermentables en tres días a temperatura ambiente. Sin embargo, estos riesgos pueden disminuirse refrigerando el jugo (Wu *et al.*, 2010) o adicionándole conservantes químicos (Kumar *et al.*, 2015). Aunque, ha sido reportado que la congelación del jugo puede modificar su composición química y posterior obtención de bioetanol (Bridgers *et al.*, 2011). Por lo tanto, es importante reducir el tiempo desde la cosecha del jugo hasta su fermentación.

Una vez identificado algunos de los factores que pudieron afectar la calidad del jugo, se procedió con el proceso de fermentación de los jugos. Considerando que el rendimiento y la concentración final de etanol dependen de la cinética de fermentación, la cual está condicionada al tiempo, la temperatura, la carga de levadura, las condiciones de agitación, el pH del medio y la concentración de sólidos en el jugo (Buruiană *et al.*, 2018; Pilap *et al.*, 2018; Laopaiboon *et al.*, 2019).

4.4.4 pH en Función del Tiempo de Fermentación

La Figura 4.2 muestra el comportamiento del pH del medio de fermentación. Fue observada diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre tratamientos y en el transcurso de la fermentación, disminuyendo con el aumento del tiempo. El pH inicial disminuyó de manera general en un rango de 4.94 (T9) a 4.00 (T5), equivalente a 19.03%. T7 y T8 mostraron una mayor disminución en las primeras 24 h, comportamiento similar al mencionado por Laopaiboon *et al.* (2019) y Phukoetphim *et al.* (2019). El resto de los

tratamientos tuvieron una disminución gradual durante todo el proceso, coincidiendo con lo reportado por Akin et al. (2008).

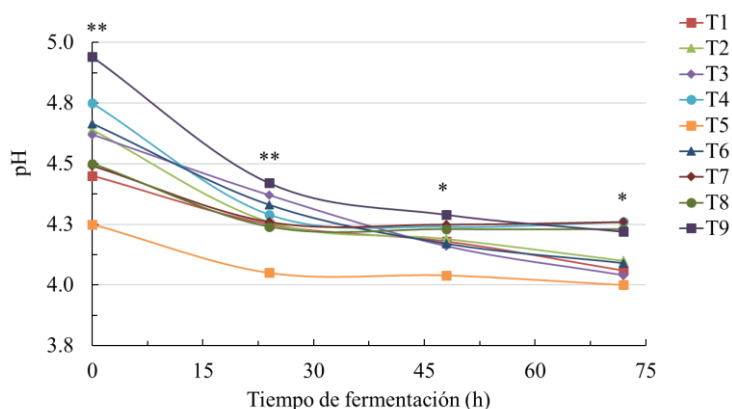


Figura 4.2. Comportamiento del pH del medio. **, $P < 0.01$; *, $P \leq 0.05$.

Las variaciones de pH pueden explicarse (entre otros factores) al efecto del tratamiento de producción. Sin embargo, en el proceso de fermentación del jugo de sorgo ha sido reportado un amplio rango de pH (3.9 a 6.5), en función de las condiciones del medio y de la levadura utilizada (Zabed *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2017; Pilap *et al.*, 2018; Duran *et al.*, 2018).

4.4.5 Grados Brix y Azúcares Reductores en Función del Tiempo de Fermentación

Los resultados de °Bx y AR presentaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$) entre tratamientos y tiempos de fermentación (Figura 4.3). T7 mostró los mayores valores iniciales de °Bx y AR (Figura 3a y 3b), que disminuyeron de 14.9 a 6% y de 127.7 a 36.8 $g \cdot L^{-1}$, respectivamente, a las 72 h. Sin embargo, en las primeras 48 h fue observada la mayor disminución en 55.03 y 60.53%, respectivamente. Sugiriendo una

alta actividad de la levadura en este período. En general todos los tratamientos tuvieron el mismo comportamiento.

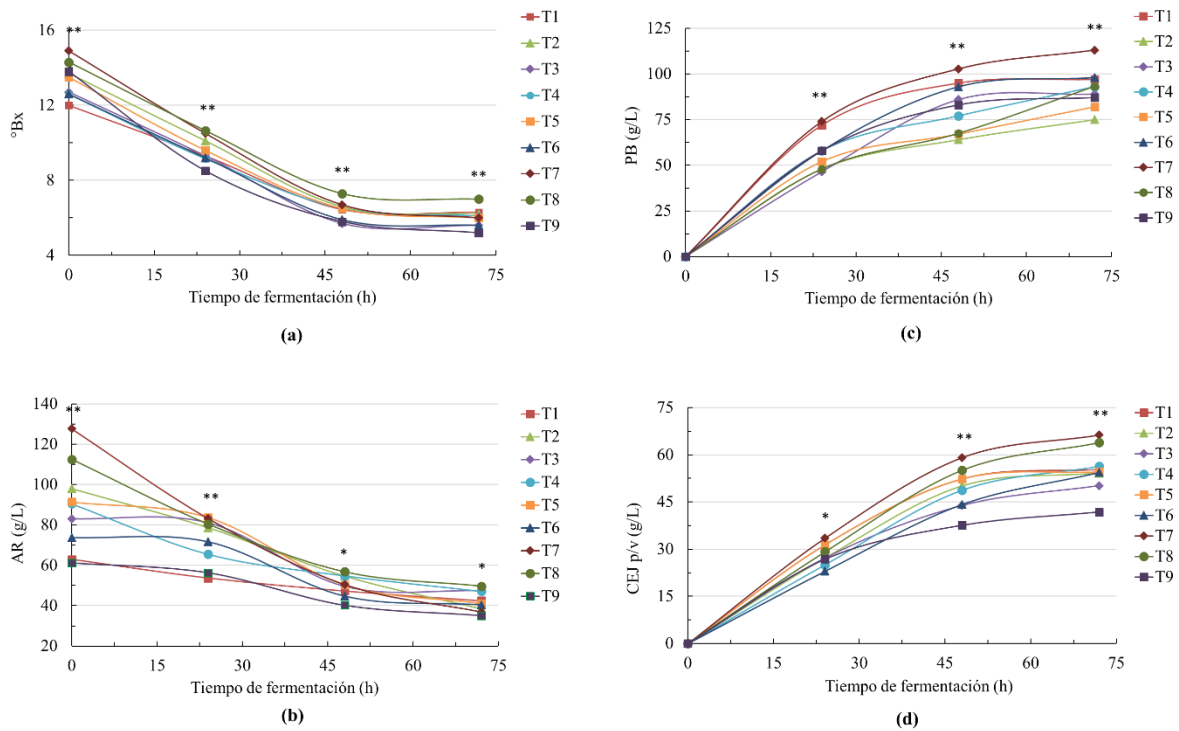


Figura 4.3. Perfil de fermentación del jugo. a) °Bx= grados Brix o contenido de sólidos solubles totales; b) AR= azúcares reductores; c) PB= producción de biomasa; d) CEJ= concentración de etanol del jugo (p/v). **, P<0.01; *, P<0.05.

Convencionalmente se ha relacionado positivamente el contenido y los tipos de azúcares fermentables del jugo con los °Bx (Guigou *et al.*, 2011; Maw *et al.*, 2016; Cole *et al.*, 2017), sin embargo, son necesarias técnicas analíticas para su determinación (Appiah-Nkansah *et al.*, 2018) ya que puede darse el comportamiento de T9, que mostró un valor inicial de °Bx (13.8) únicamente superado por T7 y T8 (Figura 3a), pero tuvo el menor contenido inicial de AR entre todos los tratamientos con 61.2 g·L⁻¹ (Figura 2b). Sugiriendo que los °Bx no son un indicador absoluto para la predicción del contenido y los tipos de azúcares presentes en el jugo de sorgo dulce, variando

también entre genotipo y condiciones de producción (Rao *et al.*, 2013). Así, no fue observada correlación ($P>0.05$) entre °Bx y AR (Cuadro 4.5).

4.4.6 Producción de Biomasa, Concentración y Rendimiento de Etanol del Jugo en Función del Tiempo de Fermentación

La PB presentó un crecimiento exponencial después de la inoculación del jugo de cada tratamiento (Figura 4.3c), sin pasar por la fase de adaptación (Lag), indicando una alta actividad de la levadura (Phukoetphim *et al.*, 2019), así como la ausencia de compuestos con niveles que inhibiera el desarrollo de la levadura (Laopaiboon *et al.*, 2007; Bai *et al.*, 2008), reflejándose en una mayor concentración de etanol (Figura 4.3d). Los mayores valores de CEJ ($66.31 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) y PB ($113.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) fueron obtenidos en T7, con una alta correlación positiva ($P<0.01$) entre estos parámetros (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Coeficiente de correlación y probabilidad entre los parámetros evaluados en la obtención de etanol.

	pH	°Bx	AR	CEJ	PB	EFE	PVE	REJ
pH	1							
°Bx	-0.088	1						
AR	0.013	0.095	1					
CEJ	0.005	-0.142	-0.730**	1				
PB	-0.008	-0.058	-0.595**	0.812**	1			
EFE	-0.071	0.477*	0.121	0.676**	-0.273	1		
PVE	0.22	0.263	-0.633**	0.937**	-0.612**	0.891**	1	
REJ	0.108	-0.151	-0.692**	0.912**	-0.553*	0.873**	0.789**	1

pH= potencial de hidrógeno; °Bx= grados Brix o contenido de sólidos solubles totales; AR= azúcares reductores; CEJ= concentración de etanol del jugo; PB= producción de biomasa; EFE= eficiencia de fermentación; PVE= productividad volumétrica de etanol; REJ= rendimiento de etanol del jugo. **, $P<0.01$ (bilateral). *, $P\leq 0.05$ (bilateral).

En las primeras 48 h de fermentación fue observado un incremento en PB y en CEJ de 50.55% y 57.72%, respectivamente. Comportamiento mostrado de manera general en todos los tratamientos. Después de las 48 h, fue observada una marcada

disminución en el nivel de PB y CEJ sugiriendo el inicio de la fase estacionaria de crecimiento de la levadura, coincidiendo con lo reportado por Kumar et al. (2015).

Comúnmente, la curva de producción de etanol con *S. cerevisiae* (cultivada en jugos de sorgo dulce) se caracteriza por tres fases: la fase logarítmica (exponencial) que se presenta durante las primeras 18 h de incubación, la fase lenta de las 18 a 24 h y la fase estacionaria de 24 a 72 h (Sarungallo et al., 2020). Como fue observado en T1, T2 y T3; sin embargo, en tratamientos como T7 (con alto contenido de azúcar), la fase exponencial se extendió por más tiempo, sugiriendo que el origen del jugo influye en su composición química. Lo cual será evaluado en futuras investigaciones.

Cabe mencionar que, el jugo de sorgo dulce con mínimos aportes de nutrientes es capaz de permitir el desarrollo de la levadura y, por tanto, la producción de etanol (Bridgers et al., 2011). CEJ supera el valor ($39.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) obtenido bajo cultivo mixto en jugos suplementados de las variedades de sorgo dulce GK-Coba, Mn 1054, Ramada, Mn4508 y SS-301, inoculados con *S. cerevisiae* ATCC 7754 y *Z. mobilis* ATCC 29191 (Khalil et al., 2015). Por tanto, los resultados obtenidos sugieren una alta conversión de los azúcares a etanol.

Además, la CEJ podría ser mejorada a través del aumentando de EFE (Cuadro 4.6) por su alta correlación positiva ($P < 0.01$; Cuadro 4.5). Asimismo, EFE mostró correlación positiva ($P \leq 0.05$) con °Bx, sin embargo, este último no presentó relación significativa ($P > 0.05$) con CEJ, confirmando que °Bx no deben considerarse un indicador absoluto para estimar la CEJ. No obstante, la EFE puede incrementarse

concentrando el jugo (Rolz *et al.*, 2019) o enriqueciéndolo a través de la suplementación con nutrientes o utilizando otras técnicas de producción, como la fermentación de muy alta gravedad (Nghiem *et al.*, 2016; Appiah-Nkansah *et al.*, 2018; Phukoetphim *et al.*, 2019).

Mientras tanto, PVE mostró una alta correlación ($P < 0.01$) positiva con CEJ y EFE, reportándose un amplio rango de PVE que oscila desde 1.14 a 3.36 g/L/h (Rolz *et al.*, 2019; Phukoetphim *et al.*, 2019), superando los valores obtenidos en nuestro estudio (Cuadro 4.6). Por otra parte, REJ tuvo la alta correlación positiva ($P < 0.01$) con CEJ, EFE y PVE (Cuadro 4.5). Si bien, EFE no alcanzó el 70%, el mayor valor de REJ (2.12 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) obtenido en T7 (Cuadro 4.6) superó el reporte de Khalil *et al.* (2015) de 1.318 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Sugiriendo que el rendimiento de etanol está asociado al origen del jugo (condiciones de producción) y al microorganismo utilizado en la fermentación.

Cuadro 4.6. Eficiencia de la fermentación, productividad volumétrica de etanol y rendimiento de etanol.

Tx	EFE (%)	VEP (g/L/h)	REJ	RTEJ	RTEG	RTET
			(m ³ ·ha ⁻¹)			
1	55.30 ±10.75 bc*	0.77 ±0.02 b	1.38 ±0.24 c	2.52 ±0.35 d	2.59 ±0.28 a	5.12 ±0.61 bc
2	50.86 ±2.78 bcd	0.75 ±0.13 bc	1.13 ± 0.06 d	2.22 ±0.13 e	2.52 ±0.50 ab	4.73 ±0.63 bc
3	43.49 ±7.87 d	0.70 ±0.19 c	0.96 ±0.12 e	2.24 ±0.41 e	1.89 ±0.24 d	4.14 ±0.43 d
4	56.11 ±7.78 b	0.78 ±0.09 b	1.56 ±0.17 b	2.78 ±0.22 bc	2.43 ±0.55 abc	5.21 ±0.77 b
5	47.71 ±4.39 cd	0.76 ±0.06 b	1.27 ±0.11 cd	2.68 ±0.11 cd	2.46 ±0.27 ab	5.13 ±0.35 bc
6	47.14 ±10.74 d	0.76 ±0.08 b	1.22 ±0.25 d	2.59 ±0.12 cd	2.19 ±0.23 bcd	4.78 ±0.34 bc
7	68.41 ±11.21 a	0.92 ±0.03 a	2.12 ±0.06 a	3.15 ±0.40 a	2.61 ±0.32 a	5.76 ±0.59 a
8	56.51 ±3.31 b	0.89 ±0.15 a	1.67 ±0.07 b	2.97 ±0.10 ab	2.06 ±0.12 cd	5.02 ±0.21 bc
9	30.29 ±7.47 e	0.58 ±0.14 d	0.83 ±0.23 e	2.74 ±0.12 bcd	1.87 ±0.72 d	4.60 ±0.83 cd
Media	50.65 ±12.10	0.77 ±0.11	1.35 ±0.40	2.65 ±0.36	2.29 ±0.44	4.94 ±0.64
P-value	0.002	0.001	0.001	0.004	0.019	0.012

Tx= tratamiento; EFE= eficiencia de la fermentación; PVE= productividad volumétrica de etanol; REJ= rendimiento de etanol del jugo; RTEJ= rendimiento teórico de etanol del jugo; RTEG= rendimiento teórico de etanol del grano; RTET= rendimiento teórico de etanol total. *, Diferentes literales en la misma columna denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

De manera general las diferencias observadas entre tratamiento para los parámetros analizados pueden atribuirse a las variaciones en las propiedades químicas del jugo. Sin embargo, el proceso de fermentación y los factores que pueden afectar su eficiencia deben estudiarse en mayor detalle.

4.4.7 Rendimiento Teórico de Bioetanol

Como complemento fue estimada la producción teórica de etanol (Cuadro 4.6) y se observó que el rendimiento teórico de etanol varió entre tratamiento ($P \leq 0.05$). T7 mostró los mayores valores de RTEJ, RTEG y RTET con 3.15, 2.61 y 5.76 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente. De manera general el etanol obtenido del jugo representó un 53.64% del RTET, sugiriendo una ventaja de la producción de bioetanol de primera generación a partir del jugo. Además de no requerirse operaciones complejas para su obtención como ocurre con el grano y en los procesos de segunda generación (Gupta *et al.*, 2019).

4.5 Conclusiones

Los resultados de este trabajo indicaron que, los rasgos específicos de la variedad de sorgo dulce ROGER asociados con la obtención de bioetanol, como el rendimiento de tallo, jugo y grados Brix varían según el sistema de producción. Así, el sistema integrado por la labranza tradicional con penetración profunda y el fertilizante orgánico tuvo los mayores valores para estos rasgos. La cinética de fermentación mostró que el jugo permite el desarrollo de la levadura, sin la necesidad de suplementación o adición de nutrientes. Además de tener concentraciones de

azúcares que permitieron altos rendimientos de bioetanol, demostrando el potencial de la variedad.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURO TRABAJO

5.1 Conclusiones

A partir del trabajo desarrollado y presentado en los capítulos 2, 3 y 4 podemos concluir que:

1. La variedad de sorgo dulce ROGER es un cultivo energético con potencial en la producción de bioetanol de primera generación, que puede ser cultivado en climas semiáridos bajo diferentes condiciones, logrando una alta producción de biomasa, jugo y azúcar. Aunque, la máxima productividad del cultivo y rendimientos de bioetanol (REJ) se logra con el uso de la labranza tradicional con penetración profunda (L3) y con fertilización orgánica (F1).

2. El consumo de energía en los sistemas de producción (SP) varió por el número de operaciones agrícolas, principalmente por labores de preparación de suelos (arado de subsuelo) y la aplicación del fertilizante inorgánico (F2). En este sentido, la entrada de energía al SP estuvo definida por el consumo de combustible diésel y del fertilizante químico. Así, la mayor eficiencia energética se obtuvo con la labranza mínima (L1) y sin aplicación de fertilizante (F3). No obstante, la mayor energía neta se logró en los SP integrados por L3 y F1.

3. El desarrollo fenológico de la planta influyó en los rendimientos agronómicos del cultivo, así como en la distribución y acumulación de azúcar del tallo, siendo la etapa de madurez fisiológica de la planta (EF9) el momento óptimo para la cosecha. En este sentido, entre la floración del cultivo y EF9 ocurre un desplazamiento de los azúcares desde la parte superior del tallo hacia su base.

4. La eficiencia de extracción del molino fue determinante en la obtención del jugo, llegando a generar considerables pérdidas; asimismo su transporte y almacenamiento contribuyeron a considerables pérdidas de azúcar.

5. La cinética de fermentación mostró que el jugo permite el desarrollo de la levadura sin la necesidad de suplementación o adición de nutrientes; además de tener concentraciones de azúcares que permiten obtener altos rendimientos de bioetanol.

6. Los resultados obtenidos contribuyen a validar la variedad ROGER para el suministro de materia prima dirigida a la obtención de bioetanol de primera generación.

5.2 Recomendaciones para futuros trabajos

El SP de ROGER podría explorarse más detalladamente para examinar el efecto de la labranza y del fertilizante sobre las propiedades del suelo y el desarrollo de la planta, en particular sobre el sistema radicular. Además de otras técnicas de producción que incluyan la cero labranza y la inoculación con micorrizas para disminuir el número de labores agrícolas y el uso de fertilizantes químicos, con el objetivo de lograr mayores rendimientos agronómicos y menores costos energéticos.

La producción de etanol podría explorarse a partir de la caracterización química del jugo, así como de su concentración y suplementación con nutrientes; además del uso de la técnica de fermentación de muy alta gravedad para lograr mayores rendimientos de bioetanol.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adewole, K. A., Adamolekun, M. T., & Akinnusi, R. (2015). Development of a Sugarcane Juice Extractor for Small Scale Industries. *Development*, 2(5), 1169-1173.
- Adimassu, Z., Alemu, G., & Tamene, L. (2019). Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the Humid Highlands of Ethiopia. *Agricultural systems*, 168, 11-18.
- Adler, P. R., Spatari, S., D'Ottone, F., Vazquez, D., Peterson, L., Del Grosso, S. J., and Parton, W. J. (2018). Legacy effects of individual crops affect N₂O emissions accounting within crop rotations. *GCB Bioenergy*, 10(2), 123-136.
- Akin, H., Brandam, C., Meyer, X. M., & Strehaiano, P. (2008). A model for pH determination during alcoholic fermentation of a grape must by *Saccharomyces cerevisiae*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(11), 1986-1993.
- Almodares, A., & Sharif, M. E. (2007). Effects of irrigation water qualities on biomass and sugar contents of sugar beet and sweet sorghum cultivars. *Journal of environmental biology*, 28(2), 213-218.

- Almodares, A., Taheri, R., Chung, M., & Fathi, M. (2008). The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars. *J. Environ. Biol*, 29(6), 849-852.
- Amaducci, S., Monti, A., & Venturi, G. (2004). Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. *Industrial Crops and Products*, 20(1), 111-118.
- Appiah-Nkansah, N. B., Zhang, K., Rooney, W., & Wang, D. (2018). Ethanol production from mixtures of sweet sorghum juice and sorghum starch using very high gravity fermentation with urea supplementation. *Industrial crops and products*, 111, 247-253.
- Ayub, M., Nadeem, M. A., Tanveer, A., & Husnain, A. (2002). Effect of different levels of nitrogen and harvesting times on the growth, yield and quality of sorghum fodder. *Asian J. Plant Sci*, 1(4), 304-307.
- Azhar, S. H. M., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Faik, A. A. M., & Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 10, 52-61.
- Baeyens, J., Kang, Q., Appels, L., Dewil, R., Lv, Y., & Tan, T. (2015). Challenges and opportunities in improving the production of bioethanol. *Progress in Energy and Combustion Science*, 47, 60-88.
- Bai, F. W., Anderson, W. A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology advances*, 26(1), 89-105.

- Bai, Y., Luo, L., & van der Voet, E. (2010). Life cycle assessment of switchgrass-derived ethanol as transport fuel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 468-477.
- Bakhite, M. A. E., Badawi, G. H., Odindo, A., & Magwaza, L. S. (2019). Assessment of The Effects of Winter Condition on Sweet Sorghum Yield and Sugar Content. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(2), 166-172.
- Bandara, A. Y., Weerasooriya, D. K., Gobena, D. D., Hopper, D. J., Tesso, T. T., & Little, C. R. (2019). Improving sweet sorghum for enhanced juice traits and biomass. *Plant Breeding*.
- Barcelos, C. A., Maeda, R. N., Santa Anna, L. M. M., & Pereira Jr, N. (2016). Sweet sorghum as a whole-crop feedstock for ethanol production. *Biomass and bioenergy*, 94, 46-56.
- Bihmidine, S., Baker, R. F., Hoffner, C., & Braun, D. M. (2015). Sucrose accumulation in sweet sorghum stems occurs by apoplasmic phloem unloading and does not involve differential sucrose transporter expression. *BMC plant biology*, 15(1), 186.
- Bonin, C. L., Heaton, E. A., Cogdill, T. J., & Moore, K. J. (2016). Management of sweet sorghum for biomass production. *Sugar tech*, 18(2), 150-159.
- Botta, G. F., Jorajuria, D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rosatto, H., & Tourn, M. (2006). Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil and tillage Research*, 91(1-2), 164-172.
- Bridgers, E. N., Chinn, M. S., Veal, M. W., & Stikeleather, L. F. (2011). Influence of juice preparations on the fermentability of sweet sorghum. *Biological engineering transactions*, 4(2), 57-67.

- Bridges, T. C., & Smith, E. M. (1979). A method for determining the total energy input for agricultural practices. *Transactions of the ASAE*, 22(4), 781-0784.
- Brulé, V., Rafsanjani, A., Pasini, D., & Western, T. L. (2016). Hierarchies of plant stiffness. *Plant Science*, 250, 79-96.
- Bunphan, D., Jaisil, P., Sanitchon, J., Knoll, J. E., & Anderson, W. F. (2015). Estimation methods and parameter assessment for ethanol yields from total soluble solids of sweet sorghum. *Industrial Crops and Products*, 63, 349-356.
- Buruiană, C. T., Vizireanu, C., & Furdui, B. (2018). Bioethanol production from sweet sorghum stalk juice by ethanol-tolerant *Saccharomyces cerevisiae* strains: An overview. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 42(2), 153-167.
- Busscher, W. J., Frederick, J. R., & Bauer, P. J. (2000). Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 999-1003.
- Capecchi, L., Nissen, L., Modesto, M., Di Girolamo, G., Cavani, L., & Barbanti, L. (2017). Crop factors influencing ethanol production from sorghum juice and bagasse. *Energies*, 10(7), 940.
- Cifuentes, R., Bressani, R., & Rolz, C. (2014). The potential of sweet sorghum as a source of ethanol and protein. *Energy for Sustainable Development*, 21, 13-19.
- Cole, M. R., Eggleston, G., Petrie, E., Uchimiya, S. M., & Dalley, C. (2017). Cultivar and maturity effects on the quality attributes and ethanol potential of sweet sorghum. *Biomass and Bioenergy*, 96, 183-192

- Cosedido, V., Vacas, R., Macarulla, B., Gracia, M. P., & Igartua, E. (2013). Agronomic and digital phenotyping evaluation of sweet sorghum public varieties and F1 hybrids with potential for ethanol production in Spain. *Maydica*, 58(1), 42-53.
- Crowell, E. A., & Ough, C. S. (1979). A modified procedure for alcohol determination by dichromate oxidation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 30(1), 61-63.
- Dar, R. A., Dar, E. A., Kaur, A., & Phutela, U. G. (2018). Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4070-4090.
- da Silva, T. M., de Oliveira, A. B., de Moura, J. G., da Trindade Lessa, B. F., & de Oliveira, L. S. B. (2019). Potential of Sweet Sorghum Juice as a Source of Ethanol for Semi-arid Regions: Cultivars and Spacing Arrangement Effects. *Sugar Tech*, 21(1), 145-152.
- Dávila-Gómez, F. J., Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Rooney, W. L., & Serna-Saldivar, S. O. (2011). Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L) Moench). *Industrial Crops and Products*, 33(3), 611-616.
- de las Cuevas Milán, H. R., Rodríguez Hernández, T., Paneque Rondón, P., & Díaz Álvarez, M. (2011). Costo energético del rodillo de cuchillas CEMA 1400 para cobertura vegetal. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 53-56.
- Díaz Fanco, A., Espinosa Ramírez, M., & Ortiz Cháirez, F. E. (2016). Promoción de biomasa y contenido de azúcares en sorgo dulce mediante abonos orgánicos y

- micorriza arbuscular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 353-360.
- Ding, N., Yang, Y., Cai, H., Liu, J., Ren, L., Yang, J., and Xie, G. H. (2017). Life cycle assessment of fuel ethanol produced from soluble sugar in sweet sorghum stalks in North China. *Journal of Cleaner Production*, 161, 335-344.
- Disasa, T., Feyissa, T., and Admassu, B. (2017). Characterization of Ethiopian sweet sorghum accessions for 0 Brix, morphological and grain yield traits. *Sugar Tech*, 19(1), 72-82.
- Durán, M. A., Dantur, K., Ruiz, R. M., Romero, E. R., Zossi, S., & Gusils, C. (2018). Effect of the clarification pH of sorghum juice on the composition of essential nutrients for fermentation. *FEMS microbiology letters*, 365(13), fny083.
- Dyjakon, A. (2018). The influence of the use of windrowers in baler machinery on the energy balance during pruned biomass harvesting in the apple orchard. *Energies*, 11(11), 3236.
- Ebrahimiqda, E., & Ogden, K. L. (2018). Evaluation and modeling of bioethanol yield efficiency from sweet sorghum juice. *BioEnergy Research*, 11(2), 449-455.
- Esengun, K., Erdal, G., Gündüz, O., & Erdal, H. (2007). An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renewable energy*, 32(11), 1873-1881.
- Fluck, R. C. (1985). Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 738-0744.
- Garofalo, P., Campi, P., Vonella, A. V., & Mastroilli, M. (2018). Application of multi-metric analysis for the evaluation of energy performance and energy use

- efficiency of sweet sorghum in the bioethanol supply-chain: A fuzzy-based expert system approach. *Applied Energy*, 220, 313-324.
- Ghosh, A., Bhattacharyya, R., Meena, M. C., Dwivedi, B. S., Singh, G., Agnihotri, R., & Sharma, C. (2018). Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol. *Soil and Tillage Research*, 177, 134-144.
- Gomez, F. E., Muliana, A. H., Niklas, K. J., & Rooney, W. L. (2017). Identifying morphological and mechanical traits associated with stem lodging in bioenergy sorghum (*Sorghum bicolor*). *Bioenergy Research*, 10(3), 635-647.
- Guigou, M., Lareo, C., Pérez, L. V., Lluberas, M. E., Vázquez, D., & Ferrari, M. D. (2011). Bioethanol production from sweet sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3058-3062.
- Gupta, R., Yadav, G., Kumar, G., Yadav, A., Saini, J. K., & Kuhad, R. C. (2019). Second generation bioethanol production: The state of art. In Sustainable approaches for biofuels production technologies (pp. 121-146). Springer, Cham.
- Gutjahr, S., Clément-Vidal, A., Soutiras, A., Sonderegger, N., Braconnier, S., Dingkuhn, M., & Luquet, D. (2013). Grain, sugar and biomass accumulation in photoperiod-sensitive sorghums. II. Biochemical processes at internode level and interaction with phenology. *Functional Plant Biology*, 40(4), 355-368.
- Haciseferogullari, H., Acaroglu, M. & Gezer, I. (2003). Determination of the energy balance of the sugar beet plant. *Energy Sources*, 25(1), 15-22.
- Han, K. J., & Alison, M. (2020). Cover crop and tillage affect sweet sorghum production and soil chemical properties. *Agronomy Journal*, 112(1), 107-116.

- Hatirli, S. A., Ozkan, B., & Fert, C. (2005). An econometric analysis of energy input–output in Turkish agriculture. *Renewable and sustainable energy reviews*, 9(6), 608-623.
- Heitman, A. J., Castillo, M. S., Smyth, T. J., Crozier, C. R., Wang, Z., Heiniger, R. W., & Gehl, R. J. (2017). Nitrogen fertilization effects on yield and nutrient removal of biomass and sweet sorghum. *Agronomy Journal*, 109(4), 1352-1358.
- Hernández, A. P., Carrillo, A. R. Q., Velázquez, S. G., Estrada, J. E., González, M. T. R., & Jiménez, L. M. (2019). Análisis de crecimiento en sorgo forrajero en dos períodos de siembra. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(5), 1083-1095.
- Holou, R. A., & Stevens, G. (2012). Juice, sugar, and bagasse response of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. M81E) to N fertilization and soil type. *Gcb Bioenergy*, 4(3), 302-310.
- Janeth, C., Karuku, G. N., Onwonga, R. N., & Kathumo, V. M. (2019). Effects of Tillage Practices and Organic Cropping Systems on the Yield of Sorghum (*sorghum bicolor* L.) and Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L) in Yatta Sub-County, Kenya. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 12(2), 232-249.
- Karuku, G. N., Onwonga, R. N., & Kathumo, V. M. (2018). Effects of Tillage Practices, Cropping Systems and Organic Inputs on Soil Nutrient Content in Machakos County. *Journal of Agriculture and Sustainability*, 13(1), 2618-2630.
- Khalil, S. R., Abdelhafez, A. A., & Amer, E. A. M. (2015). Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *Annals of Agricultural Sciences*, 60(2), 317-324.

- Kitani, O., & Jungbluth, T. (1999). Energy and biomass engineering. In CIGR–The International Commission of Agricultural Engineering; Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R.M., Ramdani, A., Eds.; American Society of Agricultural Engineers: St Joseph, MI, USA, Volume 5, 17, ISBN 0-929355-97-0.
- Kumar, C. G., Fatima, A., Rao, P. S., Reddy, B. V., Rathore, A., Rao, R. N., ... & Kamal, A. (2010). Characterization of improved sweet sorghum genotypes for biochemical parameters, sugar yield and its attributes at different phenological stages. *Sugar Tech*, 12(3-4), 322-328.
- Kumar, C. G., Rao, P. S., Gupta, S., Malapaka, J., & Kamal, A. (2015). Chemical Preservatives-Based Storage Studies and Ethanol Production from Juice of Sweet Sorghum Cultivar, ICSV 93046. *Sugar tech*, 17(4), 404-411.
- 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.
- Laopaiboon, P., Khongsay, N., Phukoetphim, N., & Laopaiboon, L. (2019). Ethanol Production from Sweet Sorghum Juice Under Very High Gravity Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*: Aeration Strategy and Its Effect on Yeast Intracellular Composition. *Chiang Mai Journal of Science*, 46(3), 481-494.
- Larnaudie, V., Rochón, E., Ferrari, M. D., & Lareo, C. (2016). Energy evaluation of fuel bioethanol production from sweet sorghum using very high gravity (VHG) conditions. *Renewable Energy*, 88, 280-287.

- Leyva, A., & de Gauna, G. R. (2011). Cultivos energéticos y biocombustibles. *Lychnos*, (6), 44-49.
- Li, S., Li, G., Zhang, L., Zhou, Z., Han, B., Hou, W., ... & Li, T. (2013). A demonstration study of ethanol production from sweet sorghum stems with advanced solid state fermentation technology. *Applied energy*, 102, 260-265.
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., ... & Zhao, B. (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175, 281-290.
- Lu, Y., Voon, M. K. W., Huang, D., Lee, P. R., & Liu, S. Q. (2017). Combined effects of fermentation temperature and pH on kinetic changes of chemical constituents of durian wine fermented with *Saccharomyces cerevisiae*. *Applied microbiology and biotechnology*, 101(7), 3005-3014.
- Mangena, P., Shimelis, H., & Laing, M. (2018). Characterisation of sweet stem sorghum genotypes for bio-ethanol production. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 68(4), 323-333.
- Mar, N. N., Linn, K., Wai, H. P., Mon, H., Soe, A. A., & Minn, M. (2019). Efficiency of Different N, P, K Fertilizer Application Methods in Sorghum to Optimize Marginal Land Productivity. *Science*, 4(2), 511-515.
- Mathur, S., Umakanth, A. V., Tonapi, V. A., Sharma, R., & Sharma, M. K. (2017). Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnology for biofuels*, 10(1), 146.

- Maw, M. J., Houx III, J. H., & Fritschi, F. B. (2016). Sweet sorghum ethanol yield component response to nitrogen fertilization. *Industrial Crops and Products*, *84*, 43-49.
- Maw, M. J., Houx, J. H., & Fritschi, F. B. (2019). Nitrogen Content and Use Efficiency of Sweet Sorghum Grown in the Lower Midwest. *Agronomy Journal*, *111*(6), 2920-2928.
- McKinley, B., Rooney, W., Wilkerson, C., & Mullet, J. (2016). Dynamics of biomass partitioning, stem gene expression, cell wall biosynthesis, and sucrose accumulation during development of Sorghum bicolor. *The Plant Journal*, *88*(4), 662-680.
- Mekdad, A., & Emam, S. (2019). Biofuel, Sugar Content, Grain Yields and Qualities of Two Sorghum bicolor in Responses to Levels and Timing of Nitrogen Applications. *Egyptian Journal of Agronomy*, *41*(2), 105-117.
- Meul, M., Nevens, F., Reheul, D., & Hofman, G. (2007). Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *119*(1-2), 135-144.
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*, *31*(3), 426-428.
- Mishra, J. S., Kumar, R., & Rao, S. S. (2017). Performance of sweet sorghum (Sorghum bicolor) cultivars as a source of green fodder under varying levels of nitrogen in semi-arid tropical India. *Sugar Tech*, *19*(5), 532-538.
- Miyashima, S., Sebastian, J., Lee, J. Y., & Helariutta, Y. (2013). Stem cell function during plant vascular development. *The EMBO journal*, *32*(2), 178-193.

- Mizuno, H., Kasuga, S., & Kawahigashi, H. (2016). The sorghum SWEET gene family: stem sucrose accumulation as revealed through transcriptome profiling. *Biotechnology for biofuels*, 9(1), 127.
- Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008). Energy use and economic analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy conversion and management*, 49(12), 3566-3570.
- Montes-García, N., Uribe-Gómez, S., Cisneros-López, M., Pecina-Quintero, V., Moreno-Gallegos, T., & Díaz-Franco, A. (2019). RB-PIRULÍ: variedad de sorgo dulce para la producción de biomasa y azúcares en México. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(1), 75-77.
- Monti, A., & Venturi, G. (2003). Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. *European Journal of Agronomy*, 19(1), 35-43.
- Morey, S. R., Hashida, Y., Ohsugi, R., Yamagishi, J., & Aoki, N. (2018). Evaluation of performance of sorghum varieties grown in Tokyo for sugar accumulation and its correlation with vacuolar invertase genes Sblnv1 and Sblnv2. *Plant Production Science*, 21(4), 328-338.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Shamshirband, S. (2016). Modeling energy consumption and greenhouse gas emissions for kiwifruit production using artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 133, 924-931.

- Nghiem, N. P., Montanti, J., & Johnston, D. B. (2016). Sorghum as a renewable feedstock for production of fuels and industrial chemicals. *Bioengineering*, 3(1), 75-91.
- Nokerbekova, N. K., Zavalin, A. A., Suleimenov, Y. T., & Zhapayev, R. K. (2018). The Nutrition Influence of Nitrogen Fertilizers on the Sugar Content of Sweet Sorghum Plants in the Southeast of Kazakhstan. *Russian Agricultural Sciences*, 44(1), 25-30.
- Olaoye, J. O. (2011). Development of a sugarcane juice extractor for small scale industries. *Journal of Agricultural Technology*, 7(4), 931-944.
- Olugbemi, O., & Abiola Ababyomi, Y. (2016). Effects of nitrogen application on growth and ethanol yield of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties. *Advances in Agriculture*, 2016.
- Olukoya, I. A., Bellmer, D., Whiteley, J. R., Clint P., and Aichele, C. P. (2015). Evaluation of the environmental impacts of ethanol production from sweet Sorghum. *Energy for Sustainable Development* 24, 1-8.
- Ou, M. S., Awasthi, D., Nieves, I., Wang, L., Erickson, J., Vermerris, W., ... and Shanmugam, K. T. (2016). Sweet sorghum juice and bagasse as feedstocks for the production of optically pure lactic acid by native and engineered *Bacillus coagulans* strains. *BioEnergy Research*, 9(1), 123-131.
- Oyier, M. O., Owuoche, J. O., Oyoo, M. E., Cheruiyot, E., Mulianga, B., & Rono, J. (2017). Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in western Kenya. *The Scientific World Journal*, 2017.

- Pabendon, M. B., Efendi, R., Santoso, S. B., and Prastowo, B. (2017, May). Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2 and its equipment for bioethanol in Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 65, No. 1, p. 012054). IOP Publishing.
- Palma, M. A. Z., Volpato, C. E. S., Barbosa, J. A., Spagnolo, R. T., de Barros, M. M., & Boas, L. (2010). Effects of work operation depth of shanks in a seeder-fertilizer on slip, traction force and fuel consumption of a tractor. *Ciência e Agrotecnologia*, 34(5), 1320-1326.
- Paneque, P., Fernandes, H. C., & de Oliveira, A. D. (2002). Comparación de cuatro sistemas de labranza/siembra en relación con su costo energético. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11(2), 1-6.
- Paneque, P., & León, D. S. (2007). Costo energético de las labores de preparación de suelo en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4), 17-21.
- Paneque, P., & Rodríguez, Y. S. (2006). Costo energético de la cosecha mecanizada del arroz en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(1), 19-23.
- Pannacci, E., & Bartolini, S. (2016). Evaluation of sorghum hybrids for biomass production in central Italy. *Biomass and Bioenergy*, 88, 135-141.
- Pervanchon, F., Bockstaller, C., & Girardin, P. (2002). Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator. *Agricultural systems*, 72(2), 149-172.
- Phukoetphim, N., Chan-u-tit, P., Laopaiboon, P., & Laopaiboon, L. (2019). Improvement of bioethanol production from sweet sorghum juice under very high

gravity fermentation: Effect of nitrogen, osmoprotectant, and aeration. *Energies*, 12(19), 3620.

Phukoetphim, N., Salakkam, A., Laopaiboon, P., & Laopaiboon, L. (2017). Improvement of ethanol production from sweet sorghum juice under batch and fed-batch fermentations: Effects of sugar levels, nitrogen supplementation, and feeding regimes. *Electronic Journal of Biotechnology*, 26, 84-92.

Pilap, W., Thanonkeo, S., Klanrit, P., & Thanonkeo, P. (2018). The potential of the newly isolated thermotolerant *Kluyveromyces marxianus* for high-temperature ethanol production using sweet sorghum juice. *3 Biotech*, 8(2), 126.

Pittelkow, C. M., Linqvist, B. A., Lundy, M. E., Liang, X., van Groenigen, K. J., Lee, J., ... & van Kessel, C. (2015). When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183, 156-168.

Pothisoong, T., & Jaisil, P. (2011). Yield potential, heterosis and ethanol production in F1 hybrids of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Current applied science and technology*, 11(1), 17-24.

Rajendran, C., Ramamoorthy, K., & Backiyarani, S. (2000). Effect of deheading on juice quality characteristics and sugar yield of sweet sorghum. *Journal of agronomy and crop science*, 185(1), 23-26.

Rao, S. S., Patil, J. V., Reddy, D. C., Kumar, B. V., Rao, P. S., & Gadakh, S. R. (2013). Effect of different crushing treatments on sweet sorghum juice extraction and sugar quality traits in different seasons. *Sugar Tech*, 15(3), 311-315.

- Rathke, G. W., Wienhold, B. J., Wilhelm, W. W., & Diepenbrock, W. (2007). Tillage and rotation effect on corn–soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil and Tillage Research*, 97(1), 60-70.
- Reddy, B. V., Ashok Kumar, A., Ravinder Reddy, C., Rao, P. P., & Patil, J. V. (2013). *Developing a sweet sorghum ethanol value chain*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
- Regassa, T. H., & Wortmann, C. S. (2014). Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. *Biomass and Bioenergy*, 64, 348-355.
- Ren, L. T., Wei, T. Y., & Xie, G. H. (2012). Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. *Energy*, 47(1), 166-173.
- Rocha, A., Araújo, A., Carvalho, A., & Sepulveda, J. (2018). A new approach for real time train energy efficiency optimization. *Energies*, 11(10), 2660.
- Rolz, C., de León, R., & de Montenegro, A. L. M. (2019). Co-production of ethanol and biodiesel from sweet sorghum juice in two consecutive fermentation steps. *Electronic Journal of Biotechnology*, 41, 13-21.
- Rolz, C., de León, R., de Montenegro, A. L. M., Porras, V., & Cifuentes, R. (2017). A multiple harvest cultivation strategy for ethanol production from sweet sorghum throughout the year in tropical ecosystems. *Renewable Energy*, 106, 103-110.
- Rono, J. K., Cheruiyot, E. K., Othira, J. O., & Njuguna, V. W. (2018). Cane Yield and Juice Volume Determine Ethanol Yield in Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *International Journal of Applied Science*, 1(2), 29-36.

- Rooney, W. L., Blumenthal, J., Bean, B., & Mullet, J. E. (2007). Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(2), 147-157.
- Roy, P., Basu, S., Chatterjee, J., Goswami, A., & Barik, S. (2018). Response of Various Yield of Sweet Sorghum Crop (*Sorghum bicolor* L. Moench) to Different Levels of Fertilizer in Lateritic Soil of Birbhum, West Bengal. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 11(1), 25-32.
- Sarungallo, R. S., Melawaty, L., Djonny, M., Bulu, L., Mangera, L., Pabendon, M. B., & Sarungallo, Z. L. Fermentation Juice Sweet Sorghum Genotip 4-183A using Batch System by Optimizing the Concentration of Inoculum and Substrate. The 1st International Conference on Education and Technology (ICETECH) 2019. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series1464 (2020) 012050.
- Sawargaonkar, G. L., & Wani, S. P. (2016). Nitrogen response of sweet sorghum genotypes during rainy season. *Current Science*, 1699-1703.
- Shoemaker, C. E., & Bransby, D. I. (2010, September). The role of sorghum as a bioenergy feedstock. In *Sustainable Alternative Fuel Feedstock Opportunities, Challenges and Roadmaps for Six US Regions. Proceedings of the Sustainable Feedstocks for Advanced Biofuel Workshop* (pp. 149-159).
- Shukla, S., Felderhoff, T. J., Saballos, A., & Vermerris, W. (2017). The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research*, 203, 181-191.
- Singh, S. & Mittal, J.P. (1992). *Energy in Production Agriculture*, 1st ed.; Mittal Publications: New Delhi, India, ISBN 81-7099-407-1.

- Snider, J. L., Raper, R. L., & Schwab, E. B. (2012). The effect of row spacing and seeding rate on biomass production and plant stand characteristics of non-irrigated photoperiod-sensitive sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Industrial crops and Products*, 37(1), 527-535.
- Sowiński, J., & Liszka-Brandau, A. (2018). Internode morphological and dry matter content difference of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids. *Acta Scientiarum Polonorum seria Agricultura*, 17(2), 91-100.
- Stout, B.A. (1990). Handbook of Energy for World Agriculture, 1st ed.; Texas A & M University: College Station, TX, USA, 50-95, ISBN 1-85166-349-5.
- Su, Y., Zhang, P., & Su, Y. (2015). An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 991-1003.
- Tabatabaeefar, A., Emamzadeh, H., Varnamkhasti, M. G., Rahimizadeh, R., & Karimi, M. (2009). Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy*, 34(1), 41-45.
- Tabatabaie, S. M. H., Rafiee, S., Keyhani, A., & Ebrahimi, A. (2013). Energy and economic assessment of prune production in Tehran province of Iran. *Journal of cleaner production*, 39, 280-284.
- Tang, C., Sun, C., Du, F., Chen, F., Ameen, A., Fu, T., & Xie, G. H. (2018). Effect of plant density on sweet and biomass Sorghum production on semiarid marginal land. *Sugar tech*, 20(3), 312-322.

- Thivierge, M. N., Chantigny, M. H., Bélanger, G., Seguin, P., Bertrand, A., & Vanasse, A. (2015). Response to nitrogen of sweet pearl millet and sweet sorghum grown for ethanol in eastern Canada. *Bioenergy research*, 8(2), 807-820.
- Tovignan, T. K., Fonceka, D., Ndoye, I., Cisse, N., & Luquet, D. (2016). The sowing date and post-flowering water status affect the sugar and grain production of photoperiodic, sweet sorghum through the regulation of sink size and leaf area dynamics. *Field crops research*, 192, 67-77.
- Tricai, E., Furlani, C. E. A., Bertonha, R. S., Silva, V. F. A., Compagnon, A. M., & Cassia, M. T. (2016). Energy demand of furrow openers and corn yield according to the soil disturbance in no till system. *African Journal of Agricultural Research*, 11(17), 1538-1542.
- Tsuchihashi, N., & Goto, Y. (2004). Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia. *Plant Production Science*, 7(4), 442-448.
- Tsuchihashi, N., & Goto, Y. (2005). Internode characteristics of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) during dry and rainy seasons in Indonesia. *Plant production science*, 8(5), 601-607.
- Vanderlip, R.L. 1993. How a sorghum plant develop. Contribution No. 1203. Kansas Agricultural Experiment Station, Manhattan, KS, USA.
- Varsa, E. C., Chong, S. K., Abolaji, J. O., Farquhar, D. A., & Olsen, F. J. (1997). Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil and Tillage research*, 43(3-4), 219-228.

- Venturi, P., & Venturi, G. (2003). Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass and Bioenergy*, 25(3), 235-255.
- Vermerris, W., & Saballos, A. (2013). Genetic enhancement of sorghum for biomass utilization. In *Genomics of the Saccharinae* (pp. 391-425). Springer, New York, NY. ISBN 978-1-4419-5947-8
- Vilche, M. S., Denoia, J., Montico, S., Tonel, B., & Dileo, N. (2006). El uso de la energía en los sistemas agropecuarios del distrito Zavalla (Santa FE). *Revista Científica Agropecuaria*, 10(1), 7-19.
- Wang, M., Chen, Y., Xia, X., Li, J., & Liu, J. (2014). Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. *Bioresource technology*, 163, 74-81.
- Williams-Alanís, H., Zavala-García, F., Arcos-Cavazos, G., Rodríguez-Vázquez, M. D. C., & Olivares-Sáenz, E. (2017). Características agronómicas asociadas a la producción de bioetanol en genotipos de sorgo dulce. *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 549-563.
- Wiśnicki, B., Chybowski, L., & Czarnecki, M. (2017). Analysis of the efficiency of port container terminals with the use of the data envelopment analysis method of relative productivity evaluation. *Management Systems in Production Engineering*, 25(1), 9-15.
- Wu, X., Staggenborg, S., Propheter, J. L., Rooney, W. L., Yu, J., & Wang, D. (2010). Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. *Industrial crops and products*, 31(1), 164-170.

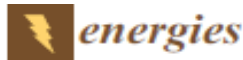
- Xuan, T. D., Phuong, N. T., Khang, D. T., & Khanh, T. D. (2015). Influence of sowing times, densities, and soils to biomass and ethanol yield of sweet sorghum. *Sustainability*, 7(9), 11657-11678.
- Yang, X., Li, M., Liu, H., Ren, L., & Xie, G. (2018). Technical Feasibility and Comprehensive Sustainability Assessment of Sweet Sorghum for Bioethanol Production in China. *Sustainability*, 10(3), 731.
- Yilmaz, I., Akcaoz, H., & Ozkan, B. (2005). An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renewable Energy*, 30(2), 145-155.
- Yoosukyingsataporn, S., & Detpiratmongkol, S. (2019). Effects of ethephon on growth and yield of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) at different growth stages. *Plant Physiology*, 10(1), 2987-2887.
- Zabed, H., Faruq, G., Sahu, J. N., Azirun, M. S., Hashim, R., & Nasrulhaq Boyce, A. (2014). Bioethanol production from fermentable sugar juice. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501.
- Zegarra, R. A. V. (2009). Biocombustibles, perspectivas, riesgos y oportunidades. *Perspectivas*, (23), 41-53.
- Zhai, Z., Li, Y. Y., Zhang, L., Pang, B., Pang, H. C., Wei, B. H., ... & Qi, S. W. (2017). Effects of short-term deep vertically rotary tillage on topsoil structure of lime concretion black soil and wheat growth in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology*, 28(4), 1211-1218.

Zhang, F., Wang, Y., Yu, H., Zhu, K., Zhang, Z., & Zou, F. L. J. (2016). Effect of excessive soil moisture stress on sweet sorghum: physiological changes and productivity. *Pak J Bot*, 48(1), 1-9.

Zhao, Y. L., Dolat, A., Steinberger, Y., Wang, X., Osman, A., & Xie, G. H. (2009). Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research*, 111(1-2), 55-64.

CAPÍTULO 7. ANEXOS

Apéndice 1



Article

Evaluation of the Use of Energy in the Production of Sweet Sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) under Different Production Systems

Iosvany López-Sandín ^{1,2}, Guadalupe Gutiérrez-Soto ¹, Adriana Gutiérrez-Díez ¹, Nancy Medina-Herrera ¹, Edgar Gutiérrez-Castorena ¹ and Francisco Zavala-García ^{1,*}

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco Villa S/N Col. Ex Hacienda El Canadá, 66415 General Escobedo, N.L., Mexico; iosvanyls@gmail.com (I.L.-S.); ggutierrez0402@gmail.com (G.G.-S.); adriana.gutierrezdz@uanl.edu.mx (A.G.-D.); nantelucas@gmail.com (N.M.-H.); vladimir@colpos.mx (E.G.-C.)

² Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila, Carretera a Morón, Km 9 1/2, 69450 Ciego de Ávila, Cuba

* Correspondence: francisco.zavalag@uanl.mx; Tel.: +52-8112-7740-14

Received: 26 March 2019; Accepted: 22 April 2019; Published: 6 May 2019



Abstract: The growing global demand for energy and the reduction of energy based on oil are driving the search for new sources of energy that are environmentally friendly. To achieve this goal, it is also necessary to optimize the related processes. In this study, the behavior of the agronomic parameters of, and the energy invested in, production systems based on a new variety of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) called ROGER were determined to define the optimal production conditions. To this end, three methods of tillage (minimum, traditional, and traditional tillage with rupture of the plow layer) and three types of fertilizers (inorganic, organic, and without fertilizer) were established, and to estimate the energy efficiency, the inputs and the energy outputs of each system were considered. The traditional tillage with breaking of the plow layer and the organic fertilizer showed the highest values of plant height (2.45 and 2.39 m, respectively); total fresh weight of the plant (51.66 and 50.77 t·ha⁻¹, respectively), of the stem (42.7 and 41.05 t·ha⁻¹, respectively), and of the juice (21.89 and 22.57 t·ha⁻¹, respectively); the volume of the juice (20,783.12 and 22,529.59 L·ha⁻¹, respectively); and Brix degrees (16.04% and 15.01%, respectively). However, the highest energy efficiency was registered in the production system that used the minimum tillage, with a value of 15.11, as well as when no fertilizer was applied with 18.68.

Keywords: energy efficiency; fertilization; tillage; agronomic parameters; ROGER variety

1. Introduction

Energy demand has increased over the years due to factors such as the growing population size, the expansion of large cities, increased living standards, increased global pollution, the reduction of natural resources and productive areas, as well as the extinction of plant and animal species. The negative effects associated with increased energy production may be mitigated if renewable energy sources are employed and increased efficiency of the related production processes is attained, so that energy consumption decreases without affecting quality of life [1,2]. Energy balances permit evaluation and comparison of the efficiency of production methods of alternative energy [3]. Energy efficiency favors sustainable agriculture [4] and accounts for energy inputs and outputs of the production system (Figure 1, first stage); however, energy uses and production differ widely among crops, production systems, and management intensities. As such, the efficiency of a production process is measured

by the relationship between the benefits obtained and the resources used. Therefore, it is important to select the correct analysis method and the right tools. However, in many cases, this depends on efficiently taking advantage of the available (conventional) resources without affecting the efficiency and quality of the process [5]. Management practices have considerable effects on the contribution and energy efficiency of crop production systems [6]; thus, energy demand in agriculture is classified according to the energy inputs of each production system [7,8]. An efficient process requires that the energy invested in the production of a biofuel unit, including its agricultural and industrial stages, be less than the energy that leaves the system [9].

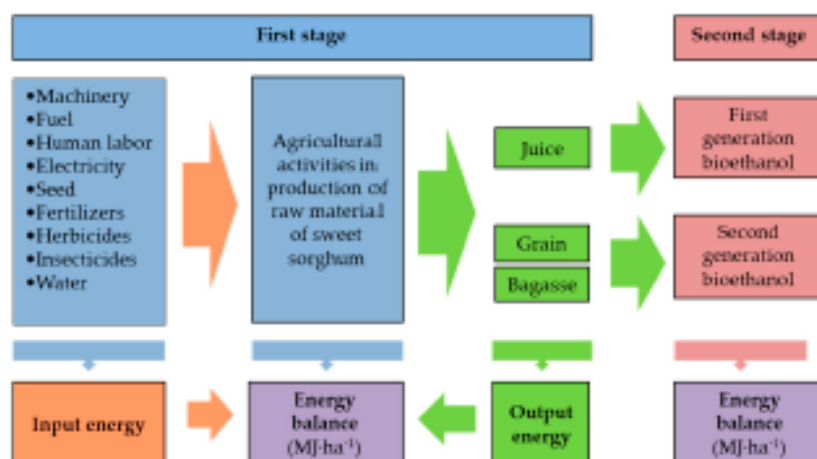


Figure 1. Block diagram of the production of raw materials of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) (first stage) and its respective energy inputs and outputs from the system.

Biofuels usually derive from vegetable or animal biomass and provide a viable source of energy. Several studies have shown that plants grown for these purposes might reduce net emissions of greenhouse gases [10]. According to Bai et al. [11], the most common biomass for fuel production includes corn, wheat, sugarcane, sugar beet, and sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). These sources have shown great potential as substitutes for conventional fuels and for reducing polluting emissions. In addition, sweet sorghum has shown great adaptability and is resistant to drought, high temperatures, and salinity. Its characteristics make it an ideal raw material for the sustainable production of biofuels with Brix degrees of 13–24%, sucrose in juice of 7.2–15.5%, total yield of sugar in stem up to 12 mg·ha⁻¹, yield of fresh stalk of 24–120 mg·ha⁻¹, and a biomass yield of 36–140 t·ha⁻¹ [12–14]. However, yields vary according to variety, cultivation conditions (soil, water, climate, pests, and diseases), inputs, and agronomic practices [15]. In comparison with other crops, it has a lower use of inputs due to the favorable combination of its agronomic and technological characteristics, making it one of the best raw materials in the production of sugar and biofuels [16–18]. Due to the high capacity of the outbreak, several harvests can be made of the same plant, which reduces the cost of labor, the time of preparation of the soil and planting, the use of seeds, and energy [19]. It is also good for producing more ethanol per unit area than other crops, requiring fewer chemical reactions and less energy to obtain it from the juice, with a minimum cost of cultivation, which can be three times less than that of sugarcane. These characteristics make sorghum a suitable crop for the production of bioethanol. Its biomass production with a limited water supply separates it from other crops [20]. Based on the above mentioned points, this research determined the agronomic parameters and energy consumed in different production systems of a new variety sweet sorghum.

2. Materials and Methods

2.1. Site Description

Research was conducted at the Marín Academic Unit of the Agronomy School at Nuevo León Autonomous University (FAUANL). This school is located at km 17 of the Zuazua–Marín Highway in the municipality of Marín, Nuevo León, México. Geographically, it is located at coordinates 25°53′ N, 100°2′ W, at 355 m above sea level. The climate corresponds to a BSi(h)w(e), and it is described as a dry warm steppe with rainfall in summer. Annual rainfall ranges between 250 and 500 mm, and the average annual temperature is 22 °C. The soil type is thin, compacted vertisol with a high content of clay and calcium carbonate, a low organic matter content, and pH between 7.5 and 8.5.

2.2. Plant Material

The ROGER sweet sorghum variety (of open pollination, photosensitive and with high content of juice and sugars in their stems), a genotype registered with the Mexican Agriculture Secretariat in the Catalog of Plant Varieties under the code SOG-261-050315, was used. This genotype has approximately 75 days to flowering, a plant height of 2.4 m, an average yield of 45 t·ha⁻¹ of fresh weight, and a crop cycle of 130 days.

2.3. Establishment and Experimental Design

For data collection, a randomized complete-block design was used with arrangements in divided plots and three repetitions. Experimental treatments were established from three tillage methods and three types of fertilization. The tillage methods corresponded to the main plots, and fertilization systems were distributed within each main plot at subplots. Each experimental unit was 6.4 × 40 m. Treatments were: L1—minimum tillage (clearing and harrowing); L2—traditional work (clearing, plowing, and harrowing); L3—traditional plowing with breaking of the plow layer (clearing, subsoil, plowing, and harrowing); F1—organic fertilization; F2—inorganic fertilization; and F3—without fertilization. In total, there were nine treatments from the combination of the mentioned factors.

2.4. Agronomic Parameters

The following agronomic parameters were measured: (1) Days to flowering (DF), when 50% of the plants were in bloom; and (2) plant height (PH), from the ground to the apex of the panicle. From a sample of 200 plants per treatment, the following variables were estimated: (3) total fresh plant weight (TPW), measured as the weight of the entire plant from 200 plants in kg; (4) stem weight (SW), for which the 200 stems were weighed without leaves and panicles; (5) leaf weight (LW), measured as the weight of fresh leaves; (6) spike weight (SW), measured only as the weight of the spike, including grain; (7) juice weight (JW), after extraction from the 200 stems, juice was collected and weighed; (8) juice volume (JV), with a graduated cylinder, the volume of the juice obtained from the 200 stems was measured; (9) degrees Brix (°B), measured using a manual digital refractometer (PAL 1) from a juice sample; and (10) total dry plant weight (DPW), obtained by drying a sample of 10 plants from the 200 harvested from each experimental unit in an oven (HAFO 1600) at 65 °C until reaching constant weight.

2.5. Agricultural Labor

Soil preparation started three months before sowing with clearing. After 21 days, when the soil was dry and in decomposition, subsoil labor was carried out according to the treatments, introducing the chisel 0.75 m into the ground and breaking compact and deep layers of the soil. After a 45-day rest period, plowing and harrowing labors were carried out, both with disk implements at a depth of 0.29 and 0.23 m, respectively. Subsequently, crossing and recrossing with disc harrow was performed. Planting was carried out on 5 March 2018 (winter-spring cycle of 2018–2019), with a depth of 0.05 m,

at a distance between rows of 0.8 m and between plants of 0.07 m, for a density of 178,500 plants ha⁻¹. A superficial drip irrigation system was used.

Organic fertilizer was applied 20 days before sowing, with a dose of 3 ton·ha⁻¹ of chicken manure (N: 60 Kg·ha⁻¹, P: 65 Kg·ha⁻¹, and K: 75 Kg·ha⁻¹). Chemical fertilizer was applied at sowing (N: 50 Kg·ha⁻¹ and P: 25 Kg·ha⁻¹) and 25 days after (N: 50 Kg·ha⁻¹ and P: 25 Kg·ha⁻¹). Pest and weed control were performed by application of pesticides and herbicides, respectively. For the cogollero worm (*Spodoptera frugiperda*), a dose of 0.6 L·ha⁻¹ of Pounce 340 CE[®] was applied on days 28 and 59 after sowing. For the yellow aphid, 0.3 L·ha⁻¹ of Murralla[®] was applied on days 32 and 81 after sowing. For the weeds, 1 L·ha⁻¹ of Fito Amina 40[®] was applied on days 35 and 64 after sowing.

Sorghum was harvested at the end of stage seven (milky grain), as described by Vanderlip [21], approximately 19 weeks after planting. In this stage, sorghum stems reach the maximum sugar concentration [22]. Plants were harvested manually at a cutting height of 0.03–0.04 m from the base of the stem.

2.6. Energy Balance

2.6.1. Energy in Mechanized Agricultural Labor

Energy consumption from mechanized agricultural labor was estimated using the methodology described by de las Cuevas et al. [23] and Paneque and Sánchez [24], based on proposals by Bridges and Smith [25] and supported by the background research of Stout [26]. This methodology determines the energy cost in MJ·h⁻¹ by adding the energy required in construction materials, manufacturing and transportation, fuel, lubricants/filters, maintenance/repair, labor, fertilizers, pesticides, and seeds. For this purpose, the energy equivalents shown in Table 1 were used.

Table 1. Energy equivalents.

Concept	Unit	Equivalent Energy (MJ·unit ⁻¹)	Source
Human Labor	Manual	1.95	[27]
	Mechanized	1.05	[28]
Machinery	kg	138 *	[27]
Diesel	L	47.8	[29]
Nitrogen	kg	77.5	[30]
Phosphorus	kg	12.44	[31]
Potassium	kg	11.15	[31]
Insecticide	kg	278	[32]
Herbicide	kg	214	[32]
Poultry Manure	kg	0.3	[28]
Seed	kg	59.50	[33]
Irrigation Water	m ³	1.02	[34]
Electricity	kW·h	11.93	[35]
Transportation	MJ·km ⁻¹ ·t ⁻¹	4.5	[27]

* Includes the energy cost in steel production plus 50% for assembly.

Total energy expenditure in mechanized agricultural activity (MJ·h⁻¹) was determined by the following equation:

$$EST = ESM + ESF + ESL + ESR + ESI + ESH + ESE \quad (1)$$

where *ESM* is the energy invested in materials, manufacture, and transport (MJ·h⁻¹); *ESF* is the energy invested in fuel (MJ·h⁻¹); *ESL* is the energy invested in lubricants/filters (MJ·h⁻¹); *ESR* is the energy invested in maintenance and repair (MJ·h⁻¹); *ESI* is the energy invested in seeds, fertilizers, herbicides, and pesticides (MJ·h⁻¹); *ESH* is the energy invested in human labor (MJ·h⁻¹); and *ESE* is the energy invested in electricity (MJ·h⁻¹) [35]. The energy invested in lubricants/filters as well as maintenance

and repairs (ESR) was estimated according to Fluck [36] and Paneque et al. [37] as 5% and 129% of the energy required in fuel (ESF) and in materials, manufacturing and transport (ESM), respectively.

The energy invested in materials, manufacturing, and transportation was determined by the following equation:

$$ESM = \frac{Wt \cdot ELt}{LLt} + \frac{Wm \cdot ELm}{LLm} \quad (2)$$

where Wt is the weight of the tractor (kg), Wm is the weight of the agricultural machinery (kg), ELt is the energy per unit mass of the tractor ($MJ \cdot kg^{-1}$), ELm is the energy per unit mass of the agricultural machinery ($MJ \cdot kg^{-1}$) [19], VUt is the useful life of the tractor (h), and VUm is the useful life of the agricultural machinery (h). Values for Wt , Wm , LLt , and LLm were taken from technical specifications in the manufacturer's catalog.

The energy corresponding to fuel was determined by the following equation:

$$ESF = \sum_{i=1}^{i=n} Ch \cdot Eqf \quad (3)$$

where Ch is the hourly fuel consumption ($L \cdot h^{-1}$), or the difference of the initial volume minus the final volume in the tractor fuel tank (L), divided by the operating time (h), and Eqf is the fuel equivalent energy ($MJ \cdot L^{-1}$) [29].

The energy corresponding to seeds, fertilizers, herbicides, and pesticides was determined by the following equation:

$$ESIN = \sum_{n=1}^{n=n} Nse \cdot Eqse + \sum_{n=1}^{n=n} Fer \cdot Eqfer + \sum_{n=1}^{n=n} Her \cdot Eqher + \sum_{n=1}^{n=n} Pes \cdot Eqpes \quad (4)$$

where Nse is the quantity of seeds planted ($kg \cdot ha^{-1}$), $Eqse$ is the equivalent energy for seed production ($MJ \cdot kg^{-1}$) [33], Fer is the amount of fertilizer applied ($kg \cdot ha^{-1}$), $Eqfer$ is the equivalent energy in the production of fertilizer ($MJ \cdot kg^{-1}$) [30,31], Her is the applied dose of herbicide ($L \cdot ha^{-1}$), $Eqher$ is the equivalent energy for production of the herbicide ($MJ \cdot L^{-1}$) [23], Pes is the applied dose of pesticides ($L \cdot ha^{-1}$), and $Eqpes$ is the equivalent energy in the production of pesticides ($MJ \cdot L^{-1}$) [32].

The energy sequestered per hectare ($MJ \cdot ha^{-1}$) was determined by the following equation:

$$ESkr = \frac{EST}{Wp} \quad (5)$$

where Wp is the hourly performance in the mechanized agricultural operation ($ha \cdot h^{-1}$).

2.6.2. Energy Indexes

The energy indexes were determined according to Tabatabaie et al. [38] and Nabavi et al. [39] as follows:

Energy efficiency (EE) is the energy provided by the resulting product(s) from the production process (OE) compared to the energy required to obtain it (IE). It is mainly used when said process is for the generation of energy (Equation (6)):

$$Energy\ efficiency = \frac{Output\ energy\ (MJ \cdot ha^{-1})}{Input\ energy\ (MJ \cdot ha^{-1})} \quad (6)$$

Energy productivity (EP) is the ratio between the amount of product(s) measured in mass units and the energy required to obtain it (Equation (7)):

$$\text{Energy productivity} = \frac{\text{Sorghum yield (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (7)$$

Specific energy (SE) is the relationship between the energy provided by the resulting product(s) of the productive process and the quantity of product(s) measured in units of mass (Equation (8)):

$$\text{Specific energy} = \frac{\text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Sorghum yield (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (8)$$

Net energy (NE) is the difference between the energy provided by the product(s) from the production process and the energy required to obtain it (Equation (9)):

$$\text{Net energy} = \text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}. \quad (9)$$

The calorific value of the dry sorghum biomass (spike, leaf, and stem) was determined using a Parr calorimeter bomb following the methodology described in the Official Mexican Norm "Determination of the Calorific Power in Solid Waste" DGN-AA-33-1976. Measurements were conducted in the laboratory of Nutrition and Food Quality of the Faculty of Agronomy, Autonomous University of Nuevo Leon.

2.7. Statistical Analysis

The effects of the different production systems on the productivity and the agronomic characteristics of the crop were determined through a randomized complete-block analysis in a split-plot arrangement using the statistical package SPSS Statistics. Subsequently, the mean comparison test was applied by the Tukey method with a probability of 5%.

3. Results and Discussion

3.1. Agronomic Parameters

Analysis of variance of the agronomic parameters in the ROGER variety is shown in Table 2. It was possible to observe significant statistical differences ($p \leq 0.05$) and highly significant differences ($p < 0.01$) but without interaction for tillage \times fertilization. Comparison of means (Table 3) showed that among tillage treatments, L3 had the highest values ($p \leq 0.05$) for PH (2.45 m), TPW (51.66 t ha⁻¹), SW (42.70 t ha⁻¹), JW (21.89 t ha⁻¹), LW (3.93 t ha⁻¹), DPW (14.76 t ha⁻¹), JV (20,783.12 L ha⁻¹), and %B (16.04%); but for all variables with the exception of LW, it was statistically equal to L2. However, no treatment presented a significant difference ($p \geq 0.05$) in DF and SW. These results may have been due to the greater depth in the tillage treatment, which allowed rupture of the plow layer and, thus, higher root development and increased nutrient availability [6,40]. This setup might contribute to increased infiltration that takes better advantage of the rainwater and controls some dormant structures from fungi and weed seeds.

Regarding types of fertilization, F1 had the highest values for PH (2.39 m), TPW (50.77 t ha⁻¹), SW (41.05 t ha⁻¹), JW (22.57 t ha⁻¹), LW (3.86 t ha⁻¹), SW (5.86 t ha⁻¹), and JV (22,529.59 L ha⁻¹), while DF, DPW, and %B were not different among treatments ($p \geq 0.05$). It is worth mentioning that for the variables mentioned, F1 was statistically equal to F2.

In general, PH values obtained were higher than those reported by Oyier et al. [41] for the EUSS10 genotype (1.88 m). There is great heterogeneity in plant size from different genotypes and varieties of sweet sorghum. Depending on the conditions of the production system and the genotype, height varies from 2 to 3 m [42]. It should be noted that sweet varieties are higher than grain producers [43] and are of great technological interest in the production of biomass and bioenergy [42]. Results for TPW, SW, and DPW reported here are similar to values from other sweet sorghum varieties for bioethanol production (from 35 to 52.12 t ha⁻¹) [44].

Table 2. Mean squares for the analysis of variance for agronomic parameters.

S.V.	D.F.	MS									
		DF	PH	TPW	SW	LW	SW	JW	JV	%B	DPW
Repetition	2	17.37	0.01	30.14	18.01	0.14	1.20	1.67	9.71×10^6	6.17	44.25
Tillage	2	22.48 ^{ns}	0.07 ^{**}	158.02 [*]	141.11 [*]	1.37 ^{**}	0.43 ^{ns}	36.70 [*]	2.83×10^7 [*]	9.80 [*]	45.66 [*]
Error (a)	4	4.04	0.0019	13.63	11.07	0.07	0.69	14.39	6.85×10^6	0.98	10.26
Fertilization	2	23.59 ^{ns}	0.01 [*]	71.96 [*]	33.58 [*]	0.66 [*]	3.86 [*]	51.15 [*]	8.74×10^7 [*]	2.01 ^{ns}	14.77 ^{ns}
Tillage × Fertilization	4	1.93 ^{ns}	0.002 ^{ns}	4.75 ^{ns}	3.47 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.61 ^{ns}	9.37 ^{ns}	7.48×10^6 ^{ns}	0.96 ^{ns}	14.31 ^{ns}
Error (b)	12	11.43	0.0012	14.50	8.32	0.10	0.86	3.94	6.01×10^6	1.06	10.67
C.V. (%)		4.56	1.48	7.96	7.41	8.68	17.55		9.84	12.76	6.91

* Significant at 0.05; ** Significant at 0.01; ns, not significant.

Table 3. Agronomic behavior of sweet sorghum according to tillage (L) and fertilization (F).

Tx	DF	PH (m)	TPW	SW	JW	LW	SW	DPW	JV	%B
			(t·ha ⁻¹)							(L·ha ⁻¹)
L1	75.89 [*]	2.28 ^c	43.35 ^b	34.81 ^b	17.95 ^b	3.17 ^b	5.37 [*]	10.27 ^b	17,283.83 ^b	14.01 ^b
L2	73.33 [*]	2.38 ^b	48.44 [*]	39.34 [*]	20.69 ^{ab}	3.66 [*]	5.43 [*]	12.18 ^{ab}	19,534.96 ^{ab}	14.62 ^{ab}
L3	73.00 [*]	2.45 [*]	51.66 [*]	42.70 [*]	21.89 [*]	3.93 [*]	5.03 [*]	14.76 [*]	20,783.12 [*]	16.04 [*]
F1	72.78 [*]	2.39 [*]	50.77 [*]	41.05 [*]	22.57 [*]	3.86 [*]	5.86 [*]	13.53 [*]	22,529.59 [*]	15.01 [*]
F2	73.56 [*]	2.38 ^{ab}	47.53 ^{ab}	38.54 ^{ab}	20.16 ^{ab}	3.59 ^{ab}	5.40 ^{ab}	12.67 [*]	18,722.60 ^b	15.29 [*]
F3	75.89 [*]	2.33 ^b	45.14 ^b	37.26 ^b	17.80 ^b	3.32 ^b	4.57 ^b	11.01 [*]	16,351.71 ^b	14.37 [*]

Tx = treatment. Different letters in the same column indicate significant differences.

Regarding production parameters for juice, JW, JV, and °B showed similarity with reported values from other varieties: values for JW ranged from 16.43 (Ramada) to 28.10 t·ha⁻¹ (Mr-4508); for JV, from 13,546.6 (EUSS10) to 22,976.9 L·ha⁻¹ (SS04); and for °B, from 11.26% (Mr-1054) to 19.12% (SS-301) [41,45]. These parameters vary by genetic, climatic, and edaphic factors [46]. Although none of the fertilization treatments included nitrogen levels of 80–120 kg·N·ha⁻¹ (recommended) for sweet sorghum [47,48], ROGER showed similar agronomic yields. This can be explained by the genotypic characteristics of the variety, which allows adaptation to limited nutrient environments [22].

3.2. Energy Balance

3.2.1. Energy in Mechanized Agricultural Labor

Table 4 shows the energy expenditure in mechanized agricultural labor for sweet sorghum production. The most energy demanding labor was F2 (9080.97 MJ·ha⁻¹), higher than F1, which was almost three times as energy efficient (3426.65 MJ·ha⁻¹) as inorganic. However, this result was lower than the 15,801 MJ·ha⁻¹ reported by Ren et al. [33] in another sweet sorghum variety. Such behavior could be the result of lower fertilization dose, specifically nitrogen. Thus, our results confirm that mineral (inorganic) fertilizers, among different sources of energy, are the greatest contributors to energy consumption [49,50]. This is particularly evident with nitrogen fertilizers.

Within the energy requirements in all the work carried out, the main source of energy for its execution was diesel fuel, which coincided with other research [49]. Subsoil labor had the maximum energy expenditure (1696.9 MJ·ha⁻¹). This number reflects the depth of labor, equipment size, speed of work, conditions, and type of soil due to the degree of compaction [51]. The traction of agricultural equipment depends on the mechanical resistance of the soil to penetration, which in turn, is influenced by the depth of labor and the tool–ground contact area of the equipment. For tool–ground contact area, the geometry of the cutting tool (angle of attack) is decisive [52]. Thus, a reduction in energy costs for high-fuel-consumption labor (subsoil and plow) could be achieved by employing multiplows that reduce labor activities [51]. Conversely, lower-energy labor corresponds to superficial soil labor [24], such as the clearing labor in this study.

Table 4. Energy expenditure of mechanized agricultural labor in sweet sorghum.

Labor	ESM	ESF [†]	ESL	ESR	ESH	ESI	Total
	MJ·ha ⁻¹						
Clearing [‡]	27.94	406.3 [‡]	23.94	36.04	0.63	-	494.55
Plowing	113.69	1386.2	112.22	146.67	1.46	-	1760.24
Subsoil	192.96	1696.9 [†]	194.09	248.91	2.23	-	2335.09
Dredge	93.67	1080.28	63.86	120.66	0.90	-	1358.17
Crossing	89.99	970.34	57.15	116.09	0.87	-	1234.44
Recrussing	83.12	978.9	57.79	107.23	0.80	-	1228.84
Sowing	115.24	812.6	47.84	148.66	9.69	417.20 [§]	1551.23
Organic fertilization	58.55	554.48	32.85	75.52	5.25	2700 [§]	3426.65
Inorganic fertilization [*]	58.55	573.6	33.88	37.55	5.39	8372 [¶]	9080.97
Weeding	38.65	836.5	49.16	49.86	0.96	-	925.97
Cultivation and hilling	25.73	573.6	33.73	33.20	0.63	-	666.89
Weed control	50.99	454.1	36.61	65.78	7.06	321 [¶]	925.54
Pest control	53.72	430.2	25.31	69.30	2.21	417 [¶]	987.74
Irrigation	139.56	1601.3 [‡]	110.08	180	7.84	214.87 [¶]	2253.65
Harvest, transport, and grinding	179.5	1625.2	137.95	231.55	24.85	-	2199.05

[†] Main source of energy; [‡] Labor with the highest energy requirement; [‡] Labor with the lowest energy requirement; [†] Higher energy input by fuel; [‡] Lower energy input by fuel; [‡] Energy used in seed; [§] Energy used in poultry manure; [¶] Energy used in inorganic fertilizer; [¶] Energy used in herbicides; [¶] Energy used in insecticides; and [‡] Electricity; [¶] Irrigation water.

3.2.2. Energy Indexes

Energy indexes in the production systems showed significant differences ($p \leq 0.05$) and highly significant differences ($p < 0.01$), without interaction between tillage and fertilization treatments (Table 5).

Table 5. Analysis of variance for energy indexes.

S.V.	D.E	MS					
		IE ¹	OE ²	EE ³	EP ⁴	SE ⁵	NE ⁶
Repetition	2	7.27×10^6	1.75×10^9	0.12	0.03	0.03	1.53×10^9
Tillage	2	1.27×10^8 **	4.73×10^9 *	15.67**	0.28*	0.25**	3.41×10^9 *
Error (a)	4	2.96×10^6	6.79×10^8	0.19	0.03	0.05	5.97×10^8
Fertilization	2	1.81×10^8 **	5.6×10^9 *	44.89**	0.89**	0.10 ^{ns}	5.08×10^9 *
Tillage × Fertilization	4	2.01×10^8 ^{ns}	3.79×10^9 ^{ns}	2.04 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.04 ^{ns}	3.88×10^9 ^{ns}
Error (b)	12	3.71×10^6	1.01×10^9	0.13	0.05	0.03	8.96×10^8
C.V. (%)		7.68	9.17	2.55	11.49	2.51	9.30

¹ Energy input; ² Energy output; ³ Energy relationship; ⁴ Energy productivity; ⁵ Specific energy; ⁶ Net energy; * Significant at 0.05; ** Significant at 0.01; ^{ns}: not significant at 0.05.

Table 6 shows the comparison of means for energy indexes for each production system.

Table 6. Energy indexes in production systems.

Tx	IE ¹	OE ²	Index			
	MJ·ha ⁻¹		EE ³	EP ⁴ (kg·MJ ⁻¹)	SE ⁵ (MJ·kg ⁻¹)	NE ⁶ (MJ·ha ⁻¹)
L1	21,278.95 ^c	321,825.07 ^b	15.11 ^a	2.04 ^a	7.42 ^a	300,246.12 ^b
L2	23,549.98 ^b	352,301.98 ^{ab}	14.96 ^a	2.05 ^a	7.27 ^{ab}	328,752 ^{ab}
L3	26,093.27 ^a	366,349.52 ^a	14.04 ^b	1.98 ^b	7.08 ^b	340,256.25 ^a
F1	20,434.93 ^b	371,806.87 ^a	18.19 ^a	2.48 ^a	7.33 ^a	351,371.94 ^a
F2	26,225.35 ^a	346,436.95 ^{ab}	13.21 ^b	1.81 ^b	7.30 ^a	320,211.64 ^{ab}
F3	17,234.09 ^c	321,932.76 ^b	18.68 ^a	2.62 ^a	7.13 ^a	304,688.67 ^b

Tx = treatment; L = tillage treatment; F = fertility treatment; ¹ Energy input; ² Energy output; ³ Energy efficiency; ⁴ Energy productivity; ⁵ Specific energy; ⁶ Net energy; and ^{a-c} Different letters in the same column denote statistically significant differences.

It is observed that the L1 (21,278.95 MJ·ha⁻¹) and F3 (17,234.09 MJ·ha⁻¹) production systems had the lowest IE per hectare. Energy input was less than the 27,089 MJ·ha⁻¹ mentioned by Ren et al. [33], but it was greater than the 18,399 MJ·ha⁻¹ reported by Dar et al. [53]. This behavior could be the result of fuel expense derived from the number of tasks or inputs used (fertilizers, herbicides, insecticides, etc.). On the other hand, the highest OE was for L3 (366,349.52 MJ·ha⁻¹) and F1 (371,806.87 MJ·ha⁻¹). These values are in the range of 250,000–422,000 MJ·ha⁻¹ [54], and they depend on the agronomic performance and calorific value of the plant material. The highest numerical value of EE was for L1 (15.11) and F3 (18.68). These values were in the range of 10–32, as mentioned by Venturi and Venturi [54], and surpassed the value of 12.4 described by Ren et al. [33]. Our results could be a product of efficient management and conditions in production systems, particularly due to effective operation of agricultural machinery [55]. EP is directly related to agronomic performance of the crop and the energy investment in the production process. L2 (2.05 kg·MJ⁻¹) and F3 (2.62 kg·MJ⁻¹) showed the highest values; these results were higher than those reported by Monti and Venturi [49] of 0.7 kg·MJ⁻¹.

In the case of SE, the highest numerical value was observed in L1 (7.42 MJ·kg⁻¹). However, the highest values of NE were shown in L3 (340,256.25 MJ·ha⁻¹) and F1 (351,371.94 MJ·ha⁻¹), but they were statistically equal to L3 and F2, respectively. These values surpassed other production systems with values of 121,500 [50] and 223,928 MJ·ha⁻¹ [53]. Our results show the energy potential of this sorghum

variety under the production systems tested, where energy indexes depended on the agronomic performance of the crop, consumption of fuel and fertilizers, and agronomic conditions of production.

4. Conclusions

The agronomic parameters of the new ROGER variety were evaluated. This variety produced considerable yields of biomass and juice despite cultivation in a semiarid zone. Likewise, the results of the energy balance indicated high energy efficiency under the different production systems tested. Both desirable characteristics show the potential that the ROGER variety has for the production of bioethanol. This potential will be evaluated in future research to obtain first- and second-generation bioethanol.

Author Contributions: Conceptualization: F.Z.G. and I.L.S.; Methodology: F.Z.G., G.G.S., A.G.D., E.G.C. and N.M.H.; Software: F.Z.G. and I.L.S.; Validation: F.Z.G., I.L.S., G.G.S., A.G.D., N.M.H. and E.G.C.; Formal analysis: F.Z.G., I.L.S. and G.G.S.; Research: F.Z.G., I.L.S. and G.G.S.; Resources: F.Z.G. and G.G.S.; Data curation: F.Z.G., I.L.S. and G.G.S.; Writing—preparation of the original draft: I.L.S., F.Z.G. and G.G.S.; Writing—revision and editing: F.Z.G., I.L.S. and G.G.S.; Visualization: F.Z.G. and I.L.S.; Supervision: F.Z.G. and G.G.S.; Project management: F.Z.G. and G.G.S.; Acquisition of funds: F.Z.G. and G.G.S.

Funding: This research was partially funded by the Autonomous University of Nuevo León, specifically, the Faculty of Agronomy. Direct funding was also received from the SWEETFUEL project (Sweet sorghum: an alternative energy crop; 227422) financed by the European Community.

Acknowledgments: To the Autonomous University of Nuevo León for the support of this research and to the National Council of Science and Technology (Conacyt) Scholarship for Doctoral Studies in Agricultural Sciences.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

DF	days to flowering
PH	plant height
TPW	total fresh plant weight
SW	stem weight
LW	leaves weight
SW	spike weight
JW	juice weight
JV	juice volume
°B	degrees Brix
DPW	total dry plant weight
EST	total energy expenditure in mechanized agricultural activity
ESF	energy invested in fuel
ESM	energy invested in materials, manufacture and transport
ESL	energy invested in lubricants
ESI	energy invested in seeds, fertilizers, herbicides, pesticides
ESR	energy invested in maintenance and repair
ESH	energy invested in human labor
ESE	energy invested in electricity
EE	energy efficiency
OE	output energy
IE	input energy
EP	energy productivity
SE	specific energy
NE	net energy

References

1. Su, Y.; Zhang, P.; Su, Y. An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *50*, 991–1003. [CrossRef]
2. Rocha, A.; Araújo, A.; Carvalho, A.; Sepulveda, J.A. New Approach for Real Time Train Energy Efficiency Optimization. *Energies* **2018**, *11*, 2660. [CrossRef]
3. Hacıoğulları, H.; Acaroglu, M.; Gezer, I. Determination of the energy balance of the sugar beet plant. *Energy Source* **2003**, *25*, 15–22. [CrossRef]
4. Perwanchon, F.; Bockstaller, C.; Girardin, P. Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator. *Agric. Syst.* **2002**, *72*, 149–172. [CrossRef]
5. Witnicki, B.; Chybowski, L.; Czarnocki, M. Analysis of the efficiency of port container terminals with the use of the Data Envelopment Analysis method of relative productivity evaluation. *Manag. Syst. Prod. Eng.* **2017**, *25*, 9–15. [CrossRef]
6. Rathke, G.W.; Wienhold, B.J.; Wilhelm, W.W.; Diepenbrock, W. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil Till Res.* **2007**, *97*, 60–70. [CrossRef]
7. Esengun, K.; Erdal, G.; Gündüz, O.; Erdal, H. An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renew. Energy* **2007**, *32*, 1873–1881. [CrossRef]
8. Wang, M.; Chen, Y.; Xia, X.; Li, J.; Liu, J. Energy efficiency and environmental performance of bioethanol production from sweet sorghum stem based on life cycle analysis. *Bioresour. Technol.* **2014**, *163*, 74–81. [CrossRef] [PubMed]
9. Larnaudie, V.; Rochon, E.; Ferrari, M.D.; Laro, C. Energy evaluation of fuel bioethanol production from sweet sorghum using very high gravity (VHG) conditions. *Renew. Energy* **2016**, *88*, 280–287. [CrossRef]
10. Mathur, S.; Umakanth, A.V.; Tonapi, V.A.; Sharma, R.; Sharma, M.K. Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnol. Biofuels* **2017**, *10*, 146. [CrossRef]
11. Bai, Y.; Luo, L.; van der Voet, E. Life cycle assessment of switchgrass-derived ethanol as transport fuel. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2010**, *15*, 468–477. [CrossRef]
12. Vermeiris, W.; Saballos, A. Genetic enhancement of sorghum for biomass utilization. In *Genomics of the Saccharinae*; Paterson, A., Ed.; Springer: New York, NY, USA, 2013; Volume 11, pp. 391–425, ISBN 978-1-4419-5947-8.
13. Cifuentes, R.; Bressani, R.; Rolz, C. The potential of sweet sorghum as a source of ethanol and protein. *Energy Sustain. Dev.* **2014**, *21*, 13–19. [CrossRef]
14. Regassa, Y.H.; Wortmann, C.S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. *Biomass Bioenergy* **2014**, *64*, 348–355. [CrossRef]
15. Mishra, J.S.; Kumar, R.; Rao, S.S. Performance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars as a source of green fodder under varying levels of nitrogen in semi-arid tropical India. *Sugar Tech.* **2017**, *19*, 532–538. [CrossRef]
16. Cosedido, V.; Vacas, R.; Macarulla, B.; Gracia, M.P.; Igarua, E. Agronomic and digital phenotyping evaluation of sweet sorghum public varieties and F1 hybrids with potential for ethanol production in Spain. *Maydica* **2013**, *58*, 42–53.
17. Barcelos, C.A.; Maeda, R.N.; Santa Anna, L.M.; Pereira, N. Sweet sorghum as a whole-crop feedstock for ethanol production. *Biomass Bioenergy* **2016**, *94*, 46–56. [CrossRef]
18. Bonin, C.L.; Heaton, E.A.; Cogdill, T.J.; Moon, K.J. Management of sweet sorghum for biomass production. *Sugar Tech.* **2016**, *18*, 150–159. [CrossRef]
19. Tsuchihashi, N.; Goto, Y. Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia. *Plant Prod. Sci.* **2004**, *7*, 442–448. [CrossRef]
20. Pabendon, M.B.; Efendi, R.; Santoso, S.B.; Prastowo, B. Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2 and its equipment for bioethanol in Indonesia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2017**, *65*. [CrossRef]
21. Vanderlip, R.L. How a Sorghum Plant Develop. Available online: <https://www.bookstore.kate.ksu.edu/pubs/s3.pdf> (accessed on 6 May 2019).
22. Davila, F.J.; Chuck, C.; Perez, E.; Rooney, W.L.; Serna, S.O. Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Ind. Crops Prod.* **2011**, *33*, 611–616. [CrossRef]

23. de las Cuevas Millán, H.R.; Rodríguez Hernández, Y.; Panoque Rondón, P.; Díaz Álvarez, M. Costo energético del rodillo de cuchillas CEMA 1400 para cobertura vegetal. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 2011, 20, 53–56.
24. Panoque, P.; Sánchez, Y. Costo energético de la cosecha mecanizada del arroz en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 2006, 15, 18–22.
25. Bridges, Y.C.; Smith, E.M. A method for determining the total energy input for agricultural practices. *Trans. ASAE* 1979, 22, 781–0784. [[CrossRef](#)]
26. Stout, B.A. *Handbook of Energy for World Agriculture*, 1st ed.; Texas A & M University: College Station, TX, USA, 1990; pp. 50–95, ISBN 1-85166-349-5.
27. Yabatabaefar, A.; Emamzadeh, H.; Varnamkhasti, M.G.; Rahimizadeh, R.; Karimi, M. Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy* 2009, 34, 41–45. [[CrossRef](#)]
28. Singh, S.; Mittal, J.P. *Energy in Production Agriculture*, 1st ed.; Mittal Publications: New Delhi, India, 1992; ISBN 81-7099-407-1.
29. Kitani, O.; Jungbluth, Y. Energy and biomass engineering. In *CIGR—The International Commission of Agricultural Engineering*; Kitani, O., Jungbluth, Y., Reart, R.M., Ramdani, A., Eds.; American Society of Agricultural Engineers: St Joseph, MI, USA, 1999; Volume 5, p. 17, ISBN 0-929355-97-0.
30. Vilche, M.S.; Dencio, J.; Montico, S.; Tonel, B.; Dileo, N. El uso de la energía en los sistemas agropecuarios del distrito Zavalla (Santa FE). *Revista Científica Agropecuaria* 2006, 10, 7–19.
31. Yilmaz, I.; Akcaoz, H.; Ozkan, B. An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. *Renew. Energy* 2005, 30, 145–155. [[CrossRef](#)]
32. Meul, M.; Nevens, E.; Reheul, D.; Hofman, G. Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2007, 119, 135–144. [[CrossRef](#)]
33. Ren, L.Y.; Liu, Z.X.; Wei, Y.Y.; Xie, G.H. Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. *Energy* 2012, 47, 166–173. [[CrossRef](#)]
34. Mohammadi, A.; Yabatabaefar, A.; Shahin, S.; Rafise, S.; Keyhani, A. Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Convers. Manag.* 2008, 49, 3566–3570. [[CrossRef](#)]
35. Hatirli, S.A.; Ozkan, B.; Fert, C. An econometric analysis of energy input–output in Turkish agriculture. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2005, 9, 608–623. [[CrossRef](#)]
36. Fluck, R.C. Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. *Trans. ASAE* 1985, 28, 738–744. [[CrossRef](#)]
37. Panoque, P.; Fernández, H.C.; de Oliveira, A.D. Comparación de cuatro sistemas de labranza/siembra en relación con su costo energético. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 2002, 11, 1–6.
38. Yabatabaefar, S.M.H.; Rafise, S.; Keyhani, A.; Ebrahimi, A. Energy and economic assessment of prune production in Tehran province of Iran. *J. Clean Prod.* 2013, 39, 280–284. [[CrossRef](#)]
39. Nabavi, A.; Rafise, S.; Hosseinzadeh, H.; Shamsirband, S. Modeling energy consumption and greenhouse gas emissions for kiwifruit production using artificial neural networks. *J. Clean Prod.* 2016, 133, 924–931. [[CrossRef](#)]
40. Furlani, C.E.A.; Bertonha, R.S.; Vicente Filho, A.S.; Compagnon, A.M.; Cassia, M.Y. Energy demand of furrow openers and corn yield according to the soil disturbance in no till system. *Afr. J. Agric. Res.* 2016, 11, 1538–1542.
41. Oyier, M.O.; Owuochi, J.O.; Oyoo, M.E.; Cheruiyot, E.; Mulianga, B.; Rono, J. Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in western Kenya. *Sci. World J.* 2017, 2017. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Disasa, Y.; Foyissa, Y.; Admassu, B. Characterization of Ethiopian sweet sorghum accessions for Brix, morphological and grain yield traits. *Sugar Tech.* 2017, 19, 72–82. [[CrossRef](#)]
43. Reddy, B.V.; Ashok Kumar, A.; Ravinder Reddy, C.; Rao, P.P.; Patil, J.V. *Developing a Sweet Sorghum Ethanol Value Chain*; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics: Patancheru, India, 2013. Available online: <http://oat.icrisat.org/id/eprint/5769> (accessed on 17 September 2017).
44. Pothisoong, Y.; Jaisil, P. Yield potential, heterosis and ethanol production in F1 hybrids of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *CAST* 2011, 11, 17–24.
45. Khalil, S.R.; Abdelhafez, A.A.; Amer, E.A.M. Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *AOAS* 2015, 60, 317–324. [[CrossRef](#)]

46. Amaducci, S.; Monti, A.; Venturi, G. Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. *Ind. Crops Prod.* **2004**, *20*, 111–118. [[CrossRef](#)]
47. Sawargaonkar, G.L.; Wani, S.P. Nitrogen response of sweet sorghum genotypes during rainy season. *Curr. Sci.* **2016**, *110*, 1699–1703.
48. Almodades, A.; Taheri, R.; Chung, M.; Fathi, M. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars. *J. Environ. Biol.* **2008**, *29*, 849–852.
49. Monti, A.; Venturi, G. Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. *Eur. J. Agron.* **2003**, *19*, 35–43. [[CrossRef](#)]
50. Ding, N.; Yang, Y.; Cai, H.; Liu, J.; Ren, L.; Yang, J.; Xie, G.H. Life cycle assessment of fuel ethanol produced from soluble sugar in sweet sorghum stalks in North China. *J. Clean. Prod.* **2017**, *161*, 335–344. [[CrossRef](#)]
51. Rondón, P.P.; León, D.S. Costo energético de las labores de preparación de suelo en Cuba. *Revista Científica Técnicas Agronegocios* **2007**, *16*, 17–21.
52. Palma, A.Z.; Volpato, E.S.; Barbosa, J.A.; Spagnolo, R.Y.; Barros, M.D.; Boas, V.; do Amaral, I. Effects of work operation depth of shanks in a seeder-fertilizer on slip, traction force and fuel consumption of a tractor. *Gênc. Agrotec.* **2010**, *34*, 1320–1326. [[CrossRef](#)]
53. Daq, R.A.; Daq, E.A.; Kaur, A.; Phubela, U.G. Sweet sorghum—a promising alternative feedstock for biofuel production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *82*. [[CrossRef](#)]
54. Venturi, P.; Venturi, G. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25*, 235–255. [[CrossRef](#)]
55. Dyjakon, A. The Influence of the Use of Windrowers in Baker Machinery on the Energy Balance during Pruned Biomass Harvesting in the Apple Orchard. *Energies* **2018**, *11*, 3236. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Apéndice 2

Manuscript ID	agronomy-825885
Status	Under review
Article type	Article
Title	Biomass and sugar production dynamics in the sweet sorghum variety ROGER
Journal	<i>Agronomy</i>
Section	Farming Sustainability
Special Issue	Climate Change, Agriculture, and Food Security
Abstract	<p>Abstract: Sweet sorghum [<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench] is a crop that stands out for its high production of biomass and sugars in the juice of its stems. However, maximum productivity can be achieved under optimal production and harvest conditions. The objective of this work was to evaluate the productivity of the sweet sorghum variety ROGER based on the dynamics of sugar production and dry biomass, considering different production methods and phenological stages of the plant (PS). The design of the experiment consisted of different tillage and fertilization methods established in a randomized complete block design with arrangement in split-plot and three replications. Data collection was performed in four PS from anthesis and until the physiological maturity of the plant. The results showed that the agronomic parameters evaluated depend on the PS ($p \leq 0.05$). Whereas, tillage and fertilization had no effect on these parameters ($p > 0.05$). The distribution and accumulation of sugar by internodes of the stem, in addition to different PS, was associated with phenological components of the plant (length and diameter of the internode). The accumulation of sugar and biomass increased with maturity. Consequently, the highest values of °B (14.89%), sugar content of the juice (22.91 g), sugar concentration of the juice (527.46 mg·g⁻¹ PS), dry biomass (60.04%) and yield dry biomass (19.01 t·ha⁻¹) were observed in the PS corresponding to the physiological maturity of the plant.</p>
Keywords	Anthesis; Phenological stage; Fertilizers; Tillage; Stem

1 Article

2 Biomass and sugar production dynamics in the sweet 3 sorghum variety ROGER

4 Iosvany López-Sandin^{1,2}, Guadalupe Gutiérrez-Soto¹, Adriana Gutiérrez-Díez, Nancy
5 Medina-Herrera¹, Edgar Gutiérrez-Castorena¹, Marisol Galicia-Juárez¹, Francisco Zavala-García^{1,*}

6 ¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco Villa S/N Col. Ex Hacienda El
7 Canadá, 66415 General Escobedo, N.L., México; iosvanyls@gmail.com (I.L.-S.); ggutierrez0402@gmail.com
8 (G.G.-S.); adriana.gutierrezdz@uanl.edu.mx (A.G.-D.); nantolucas@gmail.com (N.M.-H.);
9 vladimir@colpos.mx (E.G.-C.); marisol_349@hotmail.com (M.G.-J)

10 ² Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila,
11 Carretera a Morón, Km 9 1/2, 69450 Ciego de Ávila, Cuba; iosvanyls@gmail.com (I.L.-S.)

12 * Correspondence: francisco.zavalag@uanl.mx; Tel: +52-8112-7740-14

13 Received: date; Accepted: date; Published: date

14 **Abstract:** Sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is a crop that stands out for its high
15 production of biomass and sugars in the juice of its stems. However, maximum productivity can be
16 achieved under optimal production and harvest conditions. The objective of this work was to
17 evaluate the productivity of the sweet sorghum variety ROGER based on the dynamics of sugar
18 production and dry biomass, considering different production methods and phenological stages of
19 the plant (PS). The design of the experiment consisted of different tillage and fertilization methods
20 established in a randomized complete block design with arrangement in split-plot and three
21 replications. Data collection was performed in four PS from anthesis and until the physiological
22 maturity of the plant. The results showed that the agronomic parameters evaluated depend on the
23 PS ($p \leq 0.05$). Whereas, tillage and fertilization had no effect on these parameters ($p > 0.05$). The
24 distribution and accumulation of sugar by internodes of the stem, in addition to different PS, was
25 associated with phenological components of the plant (length and diameter of the internode). The
26 accumulation of sugar and biomass increased with maturity. Consequently, the highest values of °
27 B (14.89%), sugar content of the juice (22.91 g), sugar concentration of the juice (527.46 mg·g⁻¹ PS),
28 dry biomass (60.04%) and yield dry biomass (19.01 t·ha⁻¹) were observed in the PS corresponding to
29 the physiological maturity of the plant.

30 **Keywords:** Anthesis; Phenological stage; Fertilizers; Tillage; Stem.

32 1. Introduction

33 Sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is a C4 plant that can be grown in dissimilar
34 agroclimatic conditions and production systems with a minimum of inputs. It is characterized by
35 having high biomass production and sugar accumulation in its stems, highlighting its great
36 bioenergetic potential [1,2]. This crop can be processed as biofuel or valuable co-products, without
37 affecting the production of grain as food, fuel and fodder, reducing the conflict that they generate in
38 food security, as happens with other crops for bioenergetic purposes, such as sugar cane, sugar
39 beets, corn, and wheat. Furthermore, it allows multiple cultivation cycles per year, with high
40 productivity and agronomic stability, with the minimum demand for nitrogen [3,4].

41 Sweet sorghum has a great genetic diversity and consequently a great variation of agronomic
42 parameters, comparing against other crops. However, to achieve maximum productivity, proper
43 agronomic management is necessary [5,6]. In this sense, it has been observed that nitrogen

44 influences biomass production and the content and types of sugars in the juice, as well as the
45 properties of the soil, which can be favorably manipulated with the correct selection of the tillage
46 method [7].

47 The promising potential of sweet sorghum increases its horizon of study, emphasizing the use
48 of different fertilizers types and tillage methods [8,9]. As well as, in the estimation and evaluation of
49 ethanol based on the agronomic traits and the juice characteristics of the stems in progenitors, pure
50 lines and varieties that can be used in the biofuel industry [10,11]. In this sense, it is important to
51 identify the most opportune phenological stage for harvest, considering the dynamics of sugar
52 accumulation and biomass production [12]. Therefore, it is necessary a study at the internode level
53 [13] in order to observe the distribution of these sugars along the stem. Based on the mentioned
54 above, this research was carried out with the aim of evaluating the productivity of the ROGER sweet
55 sorghum variety, based on the dynamic production of sugar and dry biomass, considering different
56 production methods and phenological stages of the plant.

57 2. Materials and Methods

58 2.1. Study site description

59 The experiment was established in the spring-summer 2018 cycle, in the Marín experimental
60 field of the Agronomy Faculty belonging to the Autonomous University of Nuevo León (UANL),
61 located in the municipality of Marín, in the state of Nuevo León. This is located geographically at 25
62 ° 52' 13.5" north latitude and 100 ° 02' 22.56" west longitude, with an altitude of 355 masl. The
63 climate corresponds to a BSi (h) w (e), described as warm steppe dry climate with summer rains,
64 precipitation and temperatures annual average of 595 mm and 22 °C, respectively. The predominant
65 soil in this area is calcareous clay, with a pH range between 7.5 - 8.5 and low organic matter content.

66 2.2. Vegetal material

67 Sweet sorghum variety ROGER is registered by the UANL in the Plant Varieties National
68 Catalog with the same name and registration number SOG-261-050315. This genotype averages 75
69 days for flowering, with a culture cycle of 130 days.

70 2.3. Establishment and Experimental design

71 Soil preparation activities for the establishment of the crop began on November 20, 2017 with
72 the clearing work. Subsequently, the work of breaking, subsoil and harrow were carried out,
73 according to the tillage method. The sowing was carried out on March 5, 2018. This was done at a
74 depth of 0.05 m, a row spacing of 0.8 m and a density of 7 kg-ha⁻¹, using an experimental seeder
75 (Almaco®). A manual thinning was performed 20 days after sowing until an average density of 18
76 plants-m² was obtained. Fertilization work began 20 days before planting with the application of
77 organic fertilizer, with doses of 3 t-ha⁻¹ of manure (N: 60 kg-ha⁻¹; P: 65 kg-ha⁻¹; K: 75 kg-ha⁻¹).
78 Inorganic fertilizers were spread during planting (N: 50 kg-ha⁻¹, P: 25 kg-ha⁻¹) and 25 days after this
79 (N: 50 kg-ha⁻¹ and P: 25 kg-ha⁻¹). For agricultural pest control, Pounce 340 CE® pesticides were
80 applied in doses of 0.6 L-ha⁻¹ on days 28 and 59 after planting. For the control of the yellow aphid, 0.3
81 L-ha⁻¹ of Murralla® was used, applying it on days 32 and 81 after planting. For weed control, 1 L-ha⁻¹
82 of Fito Amina 40® was applied at 35 and 64 days after sowing. For the irrigation of the crop, a surface
83 drip system was used and irrigation was carried out before sowing, in addition to five aids at
84 intervals of 14 day.

85 Four sources of variation were considered in the study: (1) tillage method (T), (2) fertilizer type
86 (F), (3) position of the internode (IN) in the stem and, (4) phenological stage of the plant (P5).
87 Experimental treatments (ET) derived from different T and F established a randomized complete

88 block design with arrangements in divided plots and three replications (Table 1). The surface per
 89 experimental unit was 250 m². Tillage treatments were assigned to the large plot with three levels: T1
 90 = minimum integrated tillage of the clearing and harrow operations (up to 0.20 m depth), T2 =
 91 traditional integrated tillage of the clearing, plowing and harrowing operations (up to 0.30 m depth),
 92 T3 = traditional tillage including a subsoil operation (up to 0.75 m depth). The fertilization
 93 treatments were assigned to the subplot with three levels: F1 = organic fertilizer, F2 = inorganic
 94 fertilizer, F3 = without fertilizers. The combination of tillage and fertilizer derived a total of nine
 95 treatments.

96

Table 1. Experimental accommodation and treatments established in the study.

Repeat 1			Repeat 2			Repeat 3		
ET	Plot	Subplot	ET	Plot	Subplot	ET	Plot	Subplot
1		F1	1		F1	1		F1
2	T1	F2	2	T1	F2	2	T1	F2
3		F3	3		F3	3		F3
4		F1	4		F1	4		F1
5	T2	F2	5	T2	F2	5	T2	F2
6		F3	6		F3	6		F3
7		F1	7		F1	7		F1
8	T3	F2	8	T3	F2	8	T3	F2
9		F3	9		F3	9		F3

97 ET = experimental treatment; T1 = minimum tillage; T2 = traditional tillage; T3 = traditional tillage including a
 98 subsoil operation; F1 = organic fertilizer; F2 = inorganic fertilizer; F3 = without fertilizer

99

2.4. Data collection

100 Data collection was performed in different PS described by Vanderlip [14]. The identification of
 101 the PS was made visually (Figure 1). In the first sampling (PS6), 50% of the plants per treatment were
 102 at some stage of flowering. For the second sampling (PS7), flowering and pollination were complete
 103 and grain filling began. In the third sampling (PS8), the grains had a hard mass. While, for the fourth
 104 sampling (PS9), the culture was in the physiological maturity state. The presence of the black layer
 105 on the hilum at the base of the seed was observed, as well as a black dot in the stilar region once the
 106 glume was removed from the grain. In this last sampling, measurements by IN were not performed.



107

108

109

110

Figure 1. Phenological stages (PS) evaluated in the sweet sorghum variety ROGER: (a) 50% of the plants per treatment were at some stage of flowering, (b) flowering and pollination were complete and the grain filling, (c) the grains had a hard mass, (d) the crop was in the state of physiological maturity.

111 2.4.1. Agronomic parameters per internodes

112 The data collection by IN in the corresponding PS was carried out taking 10 plants with
 113 complete competition per plot. The leaves and leaf sheath were removed from each plant, leaving
 114 only the stem (bare stem). Subsequently, the stem was cut into pieces according to the nodes that
 115 were present at the time of sampling. IN measurement was performed by listing them from the top
 116 of the stem to the base. The length (IL) and diameter (ID) were determined for each IN. The INs were
 117 immediately cut in half to extract a juice sample that was deposited in a digital refractometer
 118 (ATAGO® 3810, PAL-1, Atago USA Inc., Bellevue, USA) to measure of total soluble solids
 119 concentration (Brix degrees; °B).

120 2.4.2. Biomass

121 To estimate biomass, the plant was separated into its morphological components (leaves, stem
 122 and panicle) and they were placed independently in paper bags and weighed on an analytical scale
 123 (Romana TORREY®) to obtain the fresh weight. Subsequently, the bags were placed in an oven
 124 (HAPO® 1600 series, USA) at 65 °C, until reaching a constant weight and thus, knowing the dry
 125 weight (DW) of each component and, consequently, the dry weight of the plant (PDW).) and the dry
 126 biomass yield per hectare (DBY). The percentage of dry biomass (DB) was determined with the
 127 following equation:

$$128 \quad DB_{CM} (\%) = \frac{DW_{CM} (g)}{PDW (g)} * 100 \quad (1)$$

129 Where: CM is the morphological component.

130 2.4.3. Stem sugar and juice dynamics production

131 To obtain the juice, another sample of 10 stems per plot was taken in each PS of the plant and
 132 processed in a juice extractor (QJH-L 100®). Juice was filtered through a sieve to remove residues to
 133 obtain the juice weight (JW) and °B. Juice extraction capacity (JEC), juice sugar content (JSC), and
 134 juice sugar concentration (JSCN) were also determined using the following equations [13,15]:

$$135 \quad JEC (\%) = \frac{JW (g)}{FSW (g)} * 100 \quad (2)$$

136 Where: JW corresponds to the juice weight, FSW to the stem fresh weight.

$$137 \quad JSC (g) = \frac{^{\circ}B * 8.827 * (FSW - SDW)}{1000} \quad (3)$$

138 Where: 8.827 is the slope of the regression line between °B and the JSCN in g·L⁻¹; SDW is the
 139 stem dry weight in g.

$$JSCN \text{ (mg g}^{-1} \text{ DW)} = \frac{SCJ}{SDW} * 1000 \quad (4)$$

140

141 *2.5. Statistic analysis*

142 The data generated by the effect of the different sources of variation on the study variables were
 143 statistically contrasted through an analysis of variance (ANOVA) and a comparison of means,
 144 according to the LSD Fisher test to a degree of significance of the 95% ($p \leq 0.05$). In addition, a
 145 correlation analysis was made using the Pearson coefficient. An angular transformation [arcsine
 146 $(Y_i)^{1/2}$] was performed on the percentage data (Y_i) and once statistically processed they were
 147 transformed to the original scale (%). The analyzes were performed in the InfoStat statistical
 148 software.

149 **3. Results and Discussion**150 *3.1. Agronomic parameters per internodes*

151 The combined analysis of variance for the agronomic traits studied by IN is presented in Table
 152 2. Significant statistical difference ($p \leq 0.01$) was observed in °B for PS only and all traits were
 153 different for IN. Regarding interactions, a significant difference ($p \leq 0.01$) was observed in the IN ×
 154 PS interaction for °B and IL.

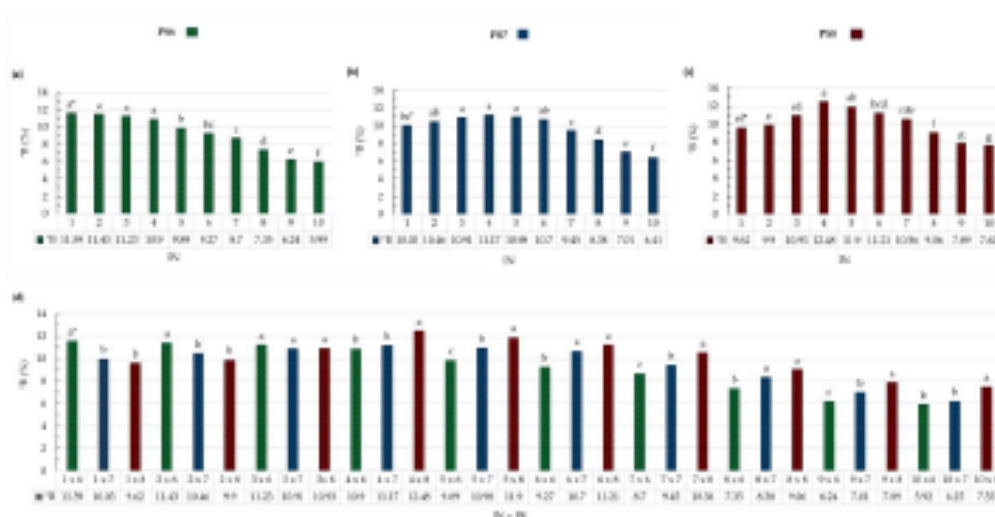
155 **Table 2.** Mean squares of the analysis of variance of the agronomic parameters per internodes in the plant
 156 phenological stages and in the production methods.

S.V.	D.F.	MS		
		°B	IL	ID
PS	2	127.89 **	9.44 ns	0.21 ns
PS > R	6	51.04 ns	48.66 ns	2.55 ns
T	2	45.68 ns	23.11 ns	0.05 ns
PS × T	4	9.43 ns	2.42 ns	0.36 ns
PS > R × T	12	20.43	11.47	0.42
F	2	7.37 ns	13.36 ns	0.12 ns
F × PS	4	11.62 ns	0.75 ns	0.32 ns
F × T	4	6.42 ns	10.23 ns	1.44 ns
F × PS × T	8	11.54 ns	13.58 ns	0.98 ns
PS > T > R × F	36	15.6	10.72	0.92
IN	9	244.78 **	3990.09 **	5.39 **
IN × PS	18	16.72 **	30.79 **	0.05 ns
IN × T	18	3.25 ns	10.22 ns	0.02 ns
IN × F	18	1.63 ns	5.76 ns	0.02 ns
IN × PS × T	36	1.25 ns	6.56 ns	0.02 ns
IN × PS × F	36	1.86 ns	4.15 ns	0.02 ns
IN × T × F	36	1.71 ns	5.55 ns	0.05 ns
Error	558	1.76	10.74	0.03
C.V. (%)		13.77	15.16	14.62

157 S.V. =source of variation; D.F. = degrees of freedom; MS = mean squares; °B = Brix degrees; IL = internode
 158 length; ID = internode diameter; PS = phenological stage; R = repetition; T = tillage; F = fertilization; IN =
 159 internode. **, $p \leq 0.01$; *, $p \leq 0.05$; ns, $p > 0.05$.

160 3.1.1. Sugar distribution and accumulation in the internodes

161 The stem of sweet sorghum is considered an organ of demand for non-structural carbohydrates
 162 [16] and PS of the plant influences the distribution and accumulation of sugar in the IN of the variety
 163 ROGER (Table 2); based on the analysis of °B, the highest concentration was during PS6 in IN1 and
 164 up to IN4 (Figure 2a). For PS7 the highest values moved to IN2 up to IN6 (Figure 2 b). Once in PS8,
 165 the highest values were observed in IN4 and IN5 (Figure 2c). Indicating that after anthesis the sugar
 166 content in the upper IN's decreases with the maturity of the plant, contrary to what was observed in
 167 the intermediate IN's. The bottom IN never changes their low °B values. This was observed in more
 168 detail in the individual analysis of each IN (Figure 2 d). IN1 (11.59%) and IN2 (11.43%) had the same
 169 behavior ($p > 0.05$) in all the PS of the plant. Both IN's showed the highest °B value in PS6, which
 170 decreased significantly in PS7 followed by a slight decrease in PS8. This behavior could be associated
 171 with the fact that the panicle initially does not yet exert a significant demand for carbohydrates that
 172 are being generated by photosynthesis in the upper part of the stem, hence the greater accumulation
 173 of sugars in the upper part [16]. There are reports that sugar accumulation can occur mainly before
 174 anthesis, once the first IN's complete their lengthening, increasing when leaf and stem growth stops,
 175 that is, in anthesis (PS6). Thus avoiding competition with grain filling [17,18].



176

177 **Figure 2.** Evolution of the concentration of total soluble solids, degrees Brix (°B) by internodes (IN) in the
 178 phenological stages (PS) of the plant, (a, b, c) distribution between IN; (d) accumulation by IN. *, Average
 179 values with a common letter are not significantly different (LSD Fisher, $p > 0.05$).

180 However, this behavior changes as the demand for carbohydrates by the developing grain
 181 increases over time. IN3 was the only one that showed no difference ($p > 0.05$) through PS. The rest
 182 of the IN towards the base of the stem (IN4 to IN10) increased their values with the maturity of the
 183 plant. Specifically, IN5, IN7, and IN9 were the only ones that presented a difference ($p \leq 0.05$) in all
 184 the PS, which could be a variety characteristic. In general, the highest value of °B was observed in
 185 IN4 and IN5 when the plant was near physiological maturity (PS8), while the lowest value was
 186 found in the IN at the base of the stem, which resulting in behavior similar to that observed in other
 187 studies [19,20]. Therefore, the accumulation of sugar by IN will depend, among other factors, on its

188 position in the stem, on the number of IN and its dimensions, on the phenological stage, as well as
 189 on the variety of sweet sorghum [20]. In some varieties of sorghum, the accumulation of sugar is
 190 more associated with the age of the IN than with the phenology of the plant itself. The latter is
 191 influenced by the effects of the photoperiod, which varies between varieties and site-specific
 192 conditions [17]. In this sense, a positive correlation ($p \leq 0.01$) was observed for °B and IL. On the
 193 contrary, both parameters were negatively related ($p \leq 0.01$) with the diameter (Table 3). This
 194 suggests that in general the sugar distribution and accumulation in the IN of the stem depend on
 195 phenological factors of the plant.

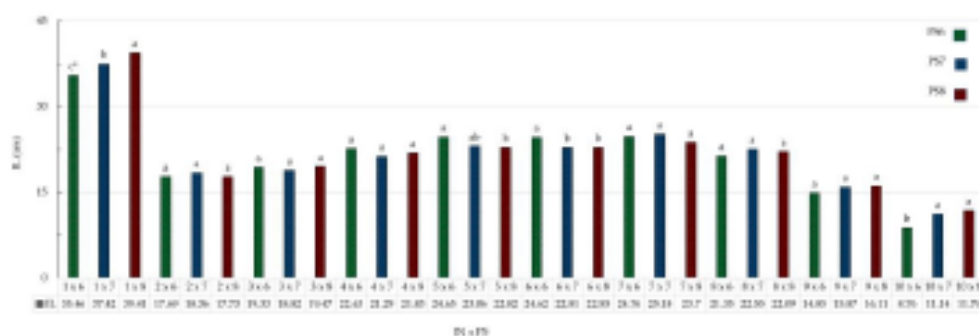
196 **Table 3.** Pearson correlation for the agronomic parameters measured per internode.

	°B	IL	ID
°B	1		
IL	0.249 **	1	
ID	-0.316 **	-0.204 **	1

197 *B= Brix degrees; IL = stem length; ID = stem diameter. **, $p \leq 0.01$.

198 3.1.2. Internode length and diameter

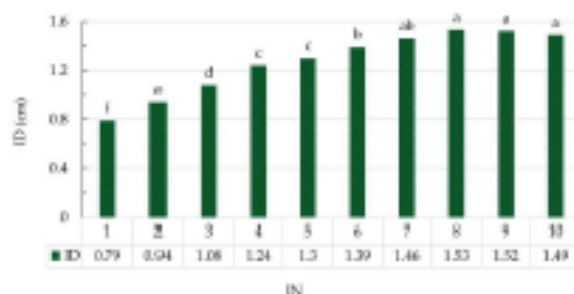
199 The greatest length of IN1 (39.41 cm) was observed in PS8 (Figure 3), doubling the length of the
 200 other INs. This internode has the particularity that corresponds to the peduncle of the panicle and is
 201 not properly a normal internode that is part of the main stem. Most of the IN showed no difference
 202 ($p > 0.05$) between PS for this characteristic, only IN1, IN5, IN6 and IN10. The mean IN length was
 203 21.61 cm. Some of these traits were similar to that observed in other varieties, where they report that
 204 the IN farthest from the base of the stem is the longest, averaging 40 cm and an average of 22 cm for
 205 the rest of the IN [16,13,21]. These results could be associated with the development of the vascular
 206 system of the plant, which allows its growth throughout the life cycle, forming new tissues and
 207 organs, the result of cell division [22]. It is known that IN dimensions can vary due to the effect of
 208 humidity, temperature, photoperiod, planting season and planting density [23,24]. The latter can
 209 increase plant height as a result of competition for light, water and nutrients, mainly inducing an
 210 increase in the number of IN or its dimensions [25,26]. Indicating that, the production conditions
 211 influence the characteristics of the stem of each variety.



212 **Figure 3.** Internode length evolution (IL) per phenological stage (PS) of the plant. *, Average values
 213 with a common letter are not significantly different (LSD Fisher, $p > 0.05$).
 214

215 In the case of the internode diameter, it did not show a significant difference ($p > 0.05$) between
 216 the PS or by the production system (Table 2). However, the distribution along the stem following a
 217 certain behavior pattern for this variable ($p \leq 0.01$). Figure 4 shows that IN8, IN9 and IN10 (those
 218 closest to the stem base) had a larger diameter (1.53 cm, 1.52 cm and 1.49 cm, respectively), which

219 decreased as they approached the stem apex, with IN1 (0.79 cm) being the thinnest. These
 220 morphological features have been reported in other sorghum genotypes and are mainly associated
 221 with the stem biomechanical function of each variety [27,24]. This will depend on genetics and their
 222 effects on the stem morphological characteristics [28], mainly conditioned by environmental and
 223 production factors [23]. Likewise, the number of IN will depend on the variety, the availability of
 224 water, the harvest stage and the planting time [23,20]. It is worth mentioning that the values
 225 obtained in the ROGER variety are in the wide range reported in other varieties from 0.7 cm to 3.13
 226 cm [13,29,26].



227

228 **Figure 4.** Diameter behavior per internode (ID) of the plant. *, Average values with a common letter
 229 are not significantly different (LSD Fisher, $p > 0.05$).

230 3.2. Biomass and components

231 Table 4 shows the analysis of variance for the biomass, juice and sugar production. Biomass
 232 production showed a significant difference ($p \leq 0.05$) only due to the effect of PS, without interaction
 233 with the other factors

234 Means in Table 5, showed the highest DBY in PS7 (from $18.65 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ to $19.01 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) with values
 235 that are in the reported range of $8.48 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ at $35.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ in other varieties of sweet sorghum
 236 [30,31,26]. Thus, the higher contribution to DBY was made by the stem with the highest value in
 237 PS9 (60.04%), similar to that shown in other varieties [31] and less than the range of 63.4% to 76.6%
 238 reported by Pannacci and Bartolini [32], which could be related to a lower planting density in
 239 ROGER. Biomass production can also vary between varieties of sweet sorghum and depend, among
 240 other factors, on the time of harvest, the plant height, the soil humidity, the tillage method and the
 241 fertilizer type applied [33–35].

242 In relation to fertilization, mainly nitrogen, it can increase biomass production, highlighting
 243 chemical fertilizers that become more efficient than organic fertilizers. Although the latter have a
 244 positive impact on soil properties, they will contribute to improving biomass yield in subsequent
 245 crop cycles [25,11,32]. Similarly, climatic conditions and the planting date of sorghum can influence
 246 the response efficiency of the crop to fertilization [36,6,13]. It is also worth mentioning the
 247 importance in the dry matter production, which depend mainly from the shape and number of
 248 leaves, since they determine the efficiency of capturing solar radiation and with it a uniform
 249 development of the plant. Thus, the size of the leaf area between floral differentiation and anthesis
 250 can influence biomass production [37,26]. The photosensitive and late maturity varieties, biomass
 251 production was the highest, associated with its accumulation throughout the growing season [38].
 252 Similarly, tall varieties show the same behavior, thick stems and many IN that can be grown at a
 253 relatively high planting density, without suffering lodging due to the biomass production, stem
 254 breakage due to the emergence of the panicle or the impact of the wind force. Therefore, biomass
 255 production can be manipulated through genetics and standard crop management practices that
 256 influence plant height, stem diameter, number of leaves, resistance to agricultural pest and diseases,
 257 as well as the susceptibility to lodging [39]. In this sense, regardless of the factors that may influence
 258 biomass production, ROGER showed high productivity..

259

Table 4. Average squares of the analysis of variance for the production of dry biomass, juice and stem sugar in the plant phenological stages and in the production methods.

S.V.	D.F.	MS								
		DLB	DSB	PDB	DBY	JW	°B	JEC	JSC	JSCN
PS	3	371.86 **	375.42 **	538.34 **	613.78 **	1168.52 *	134.27 **	16.81 *	373.35 **	252245.57 **
PS > R	8	26.42	81.21	66.39	11.77	342.41	10.02	1.96	48.48	11114.18
L	2	0.10 ns	10.90 ns	15.48 ns	13.54 ns	118.59 ns	4.14 ns	6.58 ns	12.59 ns	17099.14 ns
L × PS	6	13.86 ns	18.97 ns	18.68 ns	50.76 ns	1336.27 **	2.80 ns	8.99 *	38.77 *	21621.37 *
PS > L × R	16	8.92	17.74	23.86	24.03	250.68	1.63	2.74	6.36	6820.18
F	2	9.85 ns	2.99 ns	3.16 ns	36.02 ns	204.79 ns	0.11 ns	2.94 ns	0.89 ns	15910.92 ns
F × PS	6	3.95 ns	8.78 ns	3.96 ns	44.90 ns	181.36 ns	1.50 ns	0.89 ns	10.80 ns	5863.27 ns
F × L	4	4.06 ns	14.69 ns	7.74 ns	71.57 ns	208.50 ns	1.07 ns	1.17 ns	6.68 ns	5649.03 ns
F × PS × L	12	3.76 ns	12.63 ns	10.63 ns	41.18 ns	135.73 ns	0.78 ns	0.73 ns	3.43 ns	4043.86 ns
Error	48	7.38	7.93	10.63	17.95	337.83	1.32	1.13	12.30	8422.60
C.V.		9.70	5.96	8.16	17.37	16.70	5.94	2.57	20.01	23.28

260

261

262

S.V. = source of variation; D.F. = degrees of freedom; MS = mean squares; DLB = dry leaf biomass; DSB = dry stem biomass; PDB = panicle dry biomass; DBY = dry biomass yield; °B = Brix degrees; JW = juice weight; JEC = juice extraction capacity; JSC = juice sugar content; JSCN = juice sugar concentration; PS = phenological stage; R = repetition; T = tillage; F = fertilization. **, $p \leq 0.01$; *, $p \leq 0.05$; ns, $p > 0.05$.

263 **Table 5.** Comparison of means for the dry biomass, juice and stem sugar production in the plant
264 phenological stages and in the production methods.

S.V.	BS (%)			DBY (t·ha ⁻¹)	JW (g·planta ⁻¹)	°B (%)	JEC	JSC (g)	JSCN (mg·g ⁻¹ PS)
	Hoja	Tallo	Panoja						
PS									
6	34.58 a*	47.44 c	17.98 b	16.20 b	108.80 b	9.57 b	42.21 b	15.99 b	313.87 c
7	22.44 b	52.67 b	24.89 a	18.65 a	119.48 a	9.93 b	44.95 a	16.77 b	402.35 b
8	23.18 ab	53.44 ab	23.38 a	18.95 a	107.81 b	10.05 b	42.84 b	14.44 b	332.97 bc
9	15.16 c	60.04 a	24.83 a	19.01 a	104.19 b	14.89 a	44.72 a	22.91 a	527.46 a
Media	23.84	53.39	22.77	18.20	110.07	11.13	43.68	17.53	394.16
DMS (0.05)	3.47	5.64	5.81	0.99	11.48	1.15	1.52	2.65	65.33
PS × T									
1 × 1	28.44 a	48.22 a	23.34 a	15.62 a	112.87 bcd	17.80 a	41.08 bode	16.03 de	336.57 ef
1 × 2	29.01 a	50.30 a	20.69 a	17.04 a	102.34 cdef	18.48 a	39.86 de	16.43 d	309.40 ef
1 × 3	31.24 a	49.49 a	19.17 a	16.36 a	111.19 bode	17.44 a	40.6 cde	15.52 def	295.62 f
2 × 1	27.36 a	47.39 a	25.25 a	20.20 a	113.48 bcd	17.79 a	41.76 abc	15.81 def	378.39 de
2 × 2	29.66 a	44.08 a	26.26 a	17.64 a	112.53 bcd	17.88 a	41.42 bcd	17.22 cd	391.87 de
2 × 3	28.47 a	48.18 a	23.35 a	18.58 a	132.42 a	18.86 a	43.11 a	17.28 cd	436.79 bcd
3 × 1	30.51 a	42.02 a	27.47 a	19.16 a	94.11 f	18.44 a	39.63 e	13.44 f	277.60 f
3 × 2	28.96 a	42.79 a	28.25 a	19.12 a	98.64 def	18.83 a	40.46 cde	13.74 ef	292.82 f
3 × 3	28.83 a	42.17 a	29.00 a	19.06 a	119.80 ab	18.86 a	42.54 ab	16.13 de	428.47 cd
4 × 1	26.45 a	49.37 a	24.18 a	19.23 a	95.58 ef	21.95 a	41.84 abc	19.11 c	479.45 bc
4 × 2	26.55 a	51.51 a	21.94 a	19.35 a	113.21 bcd	22.47 a	41.49 abcd	23.19 b	514.96 ab
4 × 3	27.04 a	51.53 a	21.43 a	20.02 a	114.65 bc	23.60 a	42.57 ab	26.44 a	587.97 a
Media	29.04	47.25	23.71	18.44	110.09	19.37	41.36	17.53	394.15
DMS (0.05)	2.98	4.21	4.88	4.72	15.82	1.28	1.65	2.52	82.53

265 S.V. = source of variation; BS = dry biomass; DBY = dry biomass yield; °B = Brix degrees; JW = juice weight; JEC
266 = juice extraction capacity; JSC = juice sugar content; JSCN = juice sugar concentration. PS = phenological stage;
267 T = tillage. *, Mean values with a common letter in column are not significantly different (LSD Fisher, $p > 0.05$).

268 3.2.1. Juice and sugar dynamics production

269 Based on the dynamics accumulation that the juice and sugar production of the stem presented,
270 it was shown that these components showed a significant difference ($p \leq 0.01$; $p \leq 0.05$) among PS
271 and in the PS × L interaction (Table 4). PS7 and the PS2 × T3 interaction had the highest JW values
272 with 119.48 g·plant⁻¹ and 132.42 g·plant⁻¹, respectively (Table 5). Thus, indicating a relationship
273 between the phenology of the plant and the tillage method in the juice content of the stem. It was
274 observed that after anthesis and the beginning of the grain filling period the JW increases.
275 Meanwhile, for the period between stages of dough to physiological maturity, a gradual decrease
276 begins, corresponding to a behavior opposite to that observed in hybrids and improved varieties
277 that showed higher JW in the stage of maturity [40]. Suggesting that the JW will depend on the
278 phenological characteristics of each variety and its response to the established production conditions
279 [16,41]. In this sense, ROGER variety exceeded the reported values of 22.43 g·plant⁻¹ and 23 g·plant⁻¹
280 in two varieties grown under different doses of N, also exceeding the mean value of 54.73 g reported
281 for 16 genotypes grown in soil clayey-alkaline with traditional tillage [42,43]. These last reports were

282 developed under conditions similar to those used in this investigation under the traditional tillage
 283 method, with the exception of the subsoil operation, which suggests that deep tillage contributes to
 284 increase juice yield. It is known that the use of the subsoil plow breaks the plow floor formed by the
 285 continuous passing of the machinery over the soil [44] and thus, favors the penetration and
 286 exploration of the roots in the soil, seeking greater availability of water and nutrients, increasing the
 287 possibilities of adaptation of the plant to different types and conditions of soils [45,46]. JW was
 288 positively correlated ($p \leq 0.01$) with JEC (Table 6), indicating that JW is associated with JEC. Thus,
 289 the highest JEC value was observed in PS7 (44.95%) and in the PS2 \times T3 interaction (43.11%),
 290 although PS7 was statistically ($p > 0.05$) equal to PS9 (44.72%; Table 5). The above suggests that JEC,
 291 like JW, depend on the production conditions of the crop and, therefore, on the characteristics of the
 292 stem, mainly on the juice content [23]; not to mention the extraction capacity of the mill. However,
 293 the values obtained from JEC are in the range of 39.8% to 45.7% reported by Rono et al. [15] and
 294 exceeds the values of 39.02% and 39.20 % mentioned by Mekdad et al. [42].

295 **Table 6.** Pearson's correlation for the dry biomass, juice and sugar production.

	DLB	DSB	PDB	JW	$^{\circ}$ B	JEC	JSC
DLB	1						
DSB	-0.492 **	1					
PDB	-0.234 *	-0.732 **	1				
JW	-0.019	0.145	-0.147	1			
$^{\circ}$ B	-0.652 **	0.279 **	0.199 *	-0.05	1		
JEC	-0.299 **	0.192 *	0.02	0.714 **	0.09	1	
JSC	-0.492 **	0.356 **	-0.012	0.479 **	0.817 **	0.342 **	1
JSCN	-0.569 **	0.296 **	0.115	0.465 **	0.656 **	0.738 **	0.742 **

296 DLB = dry leaf biomass; DSB = dry stem biomass; PDB = panicle dry biomass; $^{\circ}$ B = Brix degrees; JW = juice
 297 weight; JEC = juice extraction capacity; JSC = juice sugar content; JSCN = juice sugar concentration. **, $p \leq 0.01$; *,
 298 $p \leq 0.05$.

299 Regarding sugar production, $^{\circ}$ B showed an increase with the advance of PS (Table 5). Reaching
 300 the highest value in PS9 (14.89%), similar to that observed in other varieties [47]. For this
 301 characteristic, a wide range of 3.3% to 18.9% has been reported, which will depend on the variety
 302 and PS [40,16,48]. $^{\circ}$ B was positively correlated ($p \leq 0.01$) with DSB, PDB, JSC and JSCN (Table 6).
 303 Thus, JSC and JSCN showed the highest values in PS9 with 22.91 g and 527.46 mg·g⁻¹ PS,
 304 respectively. JSC and JSCN showed variation ($p \leq 0.01$) in the PS \times T interaction. Where, PS4 \times T3
 305 showed the highest values with 26.44 g and 587.97 mg·g⁻¹ PS, respectively. On the other hand, both
 306 parameters had a positive correlation ($p \leq 0.01$), as did JW and DSB (Table 6). These values are
 307 concordance with other studies that have considered the juiciness of the stem necessary in the sugar
 308 accumulation, showing variations associated with the proportion of biomass of the plant [49,13,20].
 309 In this work, the results obtained from JSC were lower than the range of 27 g to 61 g reported for
 310 native varieties of Africa. While, JSCN is in the range of 482 mg·g⁻¹ PS to 589 mg·g⁻¹ PS for these same
 311 varieties [13]. As much $^{\circ}$ B, JSC as JSCN can increase significantly from anthesis to the physiological
 312 maturity of plants, reaching values considerably higher than those of grain sorghum [16]. Therefore,
 313 the degree of maturity of the plant and the production conditions are decisive in the accumulation of
 314 sugar in the stem. Some authors mention that the time and date of planting also influence the
 315 accumulation of sugar in the stem of sweet sorghum [23,13,50], it also happens with variations in
 316 humidity, temperatures, soil fertility and the quality of the water of irrigation [30,13,3]. In general,
 317 although the tillage and fertilization treatments did not show significant differences ($p > 0.05$) in the
 318 studied parameters, it is important to mention that under other production conditions they have
 319 been determining factors in the sweet sorghum agronomic yields [19,44,52].

320 4. Conclusions

321 The results indicated that the sugar and dry biomass production of the sweet sorghum variety
322 ROGER depend on the plant phenological stage. In addition to this, the distribution and
323 accumulation of sugar by internodes of the stem was associated with plant phenological
324 components (length and diameter of the internode). On the other hand, the accumulation of sugar
325 and biomass of the plant increased with physiological maturity. Consequently, the highest values of
326 °B (14.89%), JSC (22.91 g), JSCN (527.46 mg·g⁻¹ PS), BS (60.04%) and DBY (19.01 t·ha⁻¹) were observed
327 in PS9. Under the conditions of this study, tillage and fertilization showed no effect on the evaluated
328 agronomic parameters. However, our results may contribute to validating the production of the
329 sweet sorghum variety ROGER in areas of the state of Nuevo León. This practice will have a
330 valuable impact on the productivity of the plant material and its inclusion in other sites of interest.
331 Therefore, in future research, other factors that may help increase the variety's agronomic yields for
332 its potential application in bioethanol production will be analyzed.

333 **Author Contributions:** Conceptualization: F.Z.G. and I.L.S.; Methodology: I.L.S. and F.Z.G.; Software: I.L.S.
334 and F.Z.G.; Validation: F.Z.G., I.L.S., G.G.S., A.G.D., N.M.H., E.G.C. and M.G.J.; Formal analysis: F.Z.G., I.L.S.
335 and G.G.S.; Research: I.L.S., F.Z.G. and G.G.S.; Resources: F.Z.G. and G.G.S.; Data curation: F.Z.G., I.L.S. and
336 G.G.S.; Writing—preparation of the original draft: I.L.S., F.Z.G. and G.G.S.; Writing—revision and editing:
337 F.Z.G., I.L.S. and G.G.S.; Visualization: F.Z.G. and I.L.S.; Supervision: F.Z.G. and G.G.S.; Project management:
338 F.Z.G. and G.G.S.; Acquisition of funds: F.Z.G. and G.G.S.

339 **Funding:** This research was partially funded by the Autonomous University of Nuevo León, specifically, the
340 Faculty of Agronomy. Direct funding was also received from the SWEETFUEL project (Sweet sorghum: an
341 alternative energy crop; 227422) financed by the European Community.

342 **Acknowledgments:** To the Autonomous University of Nuevo León for the support of this research and to the
343 National Council of Science and Technology (Conacyt) Scholarship for Doctoral Studies in Agricultural
344 Sciences.

345 **Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

346 References

- 347 1. Shukla, S.; Felderhoff, T. J.; Saballos, A.; Vermerris, W. The relationship between plant height and sugar
348 accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crop Res* **2017**, *203*,
349 181–191, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>.
- 350 2. Mathur, S.; Umakanth, A. V.; Tonapi, V. A.; Sharma, R.; Sharma, M. K. Sweet sorghum as biofuel
351 feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnol Biofuels* **2017**, *10*, 146,
352 <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0834-9>.
- 353 3. Rolz, C.; de León, R.; de Montenegro, A. L. M.; Porras, V.; Cifuentes, R. A multiple harvest cultivation
354 strategy for ethanol production from sweet sorghum throughout the year in tropical ecosystems. *Renew*
355 *energ* **2017**, *106*, 103–110, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.036>.
- 356 4. Dar, R. A.; Dar, E. A.; Kaur, A.; Phutela, U. G. Sweet sorghum—a promising alternative feedstock for biofuel
357 production. *Renew Sast Energy Rev* **2018**, *82*, 4070–4090, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.066>.
- 358 5. Regassa, T. H.; Wortmann, C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. *Biomass Bioenerg*
359 **2014**, *64*, 348–355, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052>.
- 360 6. Maw, M. J.; Houx III, J. H.; Fritsch, F. B. Sweet sorghum ethanol yield component response to nitrogen
361 fertilization. *Ind Crop Prod* **2016**, *84*, 43–49, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.038>.
- 362 7. Adimassu, Z.; Alemu, G.; Tamene, L. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss
363 and crop yield in the Humid Highlands of Ethiopia. *Agr. Syst.* **2019**, *168*, 11–18,
364 <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.10.007>.
- 365 8. Mishra, J. S.; Kumar, R.; Rao, S. S. Performance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars as a source
366 of green fodder under varying levels of nitrogen in semi-arid tropical India. *Sugar Tech* **2017**, *19*, 532–538,
367 <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0506-2>.
- 368 9. Heitman, A. J.; Castillo, M. S.; Smyth, T. J.; Crozier, C. R.; Wang, Z.; Heiniger, R. W.; Gehl, R. J. Nitrogen
369 fertilization effects on yield and nutrient removal of biomass and sweet sorghum. *Agron J* **2017**, *109*,
370 1352–1358, <https://doi.org/10.2134/agronj2016.12.0710>.

- 371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
10. Bunphan, D.; Jaisil, P.; Sanitchon, J.; Knoll, J. E.; Anderson, W. F. Estimation methods and parameter assessment for ethanol yields from total soluble solids of sweet sorghum. *Ind Crop Prod* **2015**, *63*, 349–356, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.007>.
 11. Xuan, T.; Phuong, N.; Khang, D.; Khanh, T. Influence of sowing times, densities, and soils to biomass and ethanol yield of sweet sorghum. *Sustainability-based* **2015**, *7*, 11657–11678, <https://doi.org/10.3390/su70911657>.
 12. Capocchi, L.; Nissen, L.; Modesto, M.; Di Girolamo, G.; Cavani, L.; Barbanti, L. Crop factors influencing ethanol production from sorghum juice and bagasse. *Energies* **2017**, *10*, 940, <https://doi.org/10.3390/en10070940>.
 13. Tovignan, T. K.; Fonckea, D.; Ndoye, I.; Cisse, N.; Luquet, D. The sowing date and post-flowering water status affect the sugar and grain production of photoperiodic, sweet sorghum through the regulation of sink size and leaf area dynamics. *Field crop res* **2016**, *192*, 67–77, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.015>.
 14. Vanderlip, R. L. How a sorghum plant develops. Contribution No. 1203. Kansas Agricultural Experiment Station, Manhattan, KS, USA, 1993.
 15. Rono, J. K.; Cherutyot, E. K.; Othira, J. O.; Njuguna, V. W. Cane Yield and Juice Volume Determine Ethanol Yield in Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Int J Appl Sci* **2018**, *1*, 29–36, <https://doi.org/10.30560/ijas.v1n2p29>.
 16. Bihmidine, S.; Baker, R. F.; Hoffner, C.; Braun, D. M. Sucrose accumulation in sweet sorghum stems occurs by apoplasmic phloem unloading and does not involve differential Sucrose transporter expression. *BMC plant biol* **2015**, *15*, 186, <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0572-8>.
 17. Gutfahr, S.; Clément-Vidal, A.; Soutiras, A.; Sonderegger, N.; Braconnier, S.; Dingkuhn, M.; Luquet, D. Grain, sugar and biomass accumulation in photoperiod-sensitive sorghums. II. Biochemical processes at internode level and interaction with phenology. *Funct Plant Biol* **2013**, *40*, 355–368, DOI: [10.1071/fp12177](https://doi.org/10.1071/fp12177).
 18. McKinley, B.; Rooney, W.; Wilkerson, C.; Mullet, J. Dynamics of biomass partitioning, stem gene expression, cell wall biosynthesis, and sucrose accumulation during development of *Sorghum bicolor*. *TPJ* **2016**, *88*, 662–680, <https://doi.org/10.1111/tpj.13269>.
 19. Díaz Fanco, A.; Espinosa Ramírez, M.; Ortiz Cháirez, F. E. Promoción de biomasa y contenido de azúcares en sorgo dulce mediante abonos orgánicos y micorriza arbuscular. *Rev Int Cont Ambient* **2016**, *32*, 353–360, <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2016.32.03.09/46592>.
 20. Morey, S. R.; Hashida, Y.; Ohsugi, R.; Yamagishi, J.; Aoki, N. Evaluation of performance of sorghum varieties grown in Tokyo for sugar accumulation and its correlation with vacuolar invertase genes *SbInv1* and *SbInv2*. *Plant Prod Sci* **2018**, *21*, 328–338, <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1510737>.
 21. Hernández, A. P.; Carrillo, A. R. Q.; Velázquez, S. G.; Estrada, J. E.; González, M. T. R.; Jiménez, L. M. Análisis de crecimiento en sorgo forrajero en dos periodos de siembra. *Rev Mex Cienc Agri* **2019**, *10*, 1053–1095, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7038885>.
 22. Miyashima, S.; Sebastian, J.; Lee, J. Y.; Helariutta, Y. Stem cell function during plant vascular development. *The EMBO journal* **2013**, *32*, 178–193, <https://doi.org/10.1038/emboj.2012.301>.
 23. Tsuchihashi, N.; Goto, Y. Internode characteristics of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) during dry and rainy seasons in Indonesia. *Plant prod sci* **2005**, *8*, 601–607, <https://doi.org/10.1626/jpps.8.601>.
 24. Sowitfski, J.; Liszka-Brandau, A. Internode morphological and dry matter content difference of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) hybrids. *Acta Sci Pol Agricultura* **2018**, *17*, 91–100, <http://agricultura.acta.utp.edu.pl/index.php/agricultura/article/view/112/72>.
 25. Ayub, M.; Nadeem, M. A.; Tanveer, A.; Husnain, A. Effect of different levels of nitrogen and harvesting times on the growth, yield and quality of sorghum fodder. *Asian J Plant Sci* **2002**, *1*, 304–307, DOI: [10.3923/ajps.2002.304.307](https://doi.org/10.3923/ajps.2002.304.307).
 26. Tang, C.; Sun, C.; Du, F.; Chen, F.; Ameen, A.; Fu, T.; Xie, G. H. Effect of plant density on sweet and biomass Sorghum production on semiarid marginal land. *Sugar tech* **2018**, *20*, 312–322, <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0553-3>.
 27. Gomez, F. E.; Mulliana, A. H.; Niklas, K. J.; Rooney, W. L. Identifying morphological and mechanical traits associated with stem lodging in bioenergy sorghum (*Sorghum bicolor*). *Bioenergy Res* **2017**, *10*, 635–647, <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9826-7>.
 28. Brulé, V.; Rafsanjani, A.; Pasini, D.; Western, T. L. Hierarchies of plant stiffness. *Plant Sci* **2016**, *250*, 79–96, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.06.002>.

- 424 29. Mangena, P.; Shimsalis, H.; Laing, M. Characterisation of sweet stem sorghum genotypes for bio-ethanol
425 production. *Acta Agr Scand B-S P* **2018**, *68*, 323-333, <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1400586>.
- 426 30. Almodares, A.; Sharif, M. E. Effects of irrigation water qualities on biomass and sugar contents of sugar
427 beet and sweet sorghum cultivars. *J Environ Biol* **2007**, *28*, 213-218,
428 http://jeb.co.in/journal_issues/200704_apr07/paper_12.pdf.
- 429 31. Zhao, Y. L.; Dolat, A.; Steinberger, Y.; Wang, X.; Osman, A.; Xie, G. H. Biomass yield and changes in
430 chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crop Res* **2009**, *111*, 55-64,
431 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.006>.
- 432 32. Pannacci, E.; Bartolini, S. Evaluation of sorghum hybrids for biomass production in central Italy. *Biomass*
433 *Bioenerg* **2016**, *88*, 135-141, <https://doi.org/10.1016/j.biombio.2016.03.024>.
- 434 33. Pittekkow, C. M.; Linquist, B. A.; Lundy, M. E.; Liang, X.; van Groenigen, K. J.; Lee, J.; van Kessel, C. When
435 does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crop Res* **2015**, *183*, 156-168,
436 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>.
- 437 34. Zhang, F.; Wang, Y.; Yu, H.; Zhu, K.; Zhang, Z.; Zou, F. L. J. Effect of excessive soil moisture stress on
438 sweet sorghum physiological changes and productivity. *Pak J Bot* **2016**, *48*, 1-9,
439 [https://www.nakhs.org/trilbot/PDFs/48\(1\)01.pdf](https://www.nakhs.org/trilbot/PDFs/48(1)01.pdf).
- 440 35. Olugbemi, O.; Abiola Abayomi, Y. Effects of nitrogen application on growth and ethanol yield of sweet
441 sorghum [Sorghum bicolor (L.) Moench] varieties. *Advances in Agriculture* **2016**, *2016*,
442 <https://dx.doi.org/10.1155/2016/8329794>.
- 443 36. Snider, J. L.; Raper, R. L.; Schwab, E. B. The effect of row spacing and seeding rate on biomass production
444 and plant stand characteristics of non-irrigated photoperiod-sensitive sorghum (*Sorghum bicolor* (L.)
445 Moench). *Ind Crop Prod* **2012**, *37*, 527-535, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.032>.
- 446 37. Vermerris, W.; Saballos, A. Genetic enhancement of sorghum for biomass utilization. In *Genomics of the*
447 *Saccharinae*; Paterson A., Eds; Springer: New York, NY, USA, 2013; Volumen 11, pp. 391-425, ISBN
448 978-1-4419-5947-8
- 449 38. Rooney, W. L.; Blumenthal, J.; Bean, B.; Mullet, J. E. Designing sorghum as a dedicated bioenergy
450 feedstock. *Biofuels, Bioprod Biorefin* **2007**, *1*, 147-157, <https://doi.org/10.1002/bbb.15>.
- 451 39. Shoemaker, C. E.; Bransby, D. I. The role of sorghum as a bioenergy feedstock. In *Sustainable Alternative*
452 *Fuel Feedstock Opportunities, Challenges and Roadmaps for Six US Regions*, Proceedings of the
453 *Sustainable Feedstocks for Advanced Biofuel Workshop*, Paris, Francia, 15-16 September 2010; pp.
454 149-159.
- 455 40. Kumar, C. G.; Fatima, A.; Rao, P. S.; Reddy, B. V.; Rathore, A.; Rao, R. N.; Kamal, A. Characterization of
456 improved sweet sorghum genotypes for biochemical parameters, sugar yield and its attributes at different
457 phenological stages. *Sugar Tech* **2010**, *12*, 322-328, <https://doi.org/10.1007/s12355-010-0045-1>.
- 458 41. da Silva, T. M.; de Oliveira, A. B.; de Moura, J. G.; da Trindade Lessa, B. F.; de Oliveira, L. S. B. Potential of
459 Sweet Sorghum Juice as a Source of Ethanol for Semi-arid Regions: Cultivars and Spacing Arrangement
460 Effects. *Sugar Tech* **2019**, *21*, 145-152, <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0637-8>.
- 461 42. Mokdad, A.; Enam, S. Biofuel, Sugar Content, Grain Yields and Qualities of Two Sorghum bicolor in
462 Responses to Levels and Timing of Nitrogen Applications. *Egypt J Agros* **2019**, *41*, 105-117, DOI:
463 [10.21608/eaero.2019.10075.1152](https://doi.org/10.21608/eaero.2019.10075.1152).
- 464 43. Bakhtie, M. A. E.; Badawi, G. H.; Odindo, A.; Magwaza, L. S. Assessment of The Effects of Winter
465 Condition on Sweet Sorghum Yield and Sugar Content. *Tarjef* **2019**, *7*, 166-172,
466 <https://doi.org/10.24925/tarjef.v7i2.166-172.1888>.
- 467 44. Zhai, Z.; Li, Y. Y.; Zhang, L.; Pang, B.; Pang, H. C.; Wei, B. H.; Qi, S. W. Effects of short-term deep vertically
468 rotary tillage on topsoil structure of lime concretion black soil and wheat growth in Huang-Huai-Hai
469 Plain, China. *Chin J Appl Ecol* **2017**, *28*, 1211-1218. DOI: [10.13287/1001-9332.201704.016](https://doi.org/10.13287/1001-9332.201704.016).
- 470 45. Schneider, F.; Don, A.; Hennings, I.; Schmittmann, O.; Seidel, S. J. The effect of deep tillage on crop
471 yield—What do we really know?. *Soil till res* **2017**, *174*, 193-204, <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.005>.
- 472 46. Fan, Y.; Miguez-Macho, G.; Jobbágy, E. G.; Jackson, R. B.; Otero-Casal, C. Hydrologic regulation of plant
473 rooting depth. *PNAS* **2017**, *114*, 10572-10577, <https://doi.org/10.1073/pnas.1712381114>.
- 474 47. Oyler, M. O.; Owuochi, J. O.; Oyoo, M. E.; Cheruiyot, E.; Mullanga, B.; Rono, J. Effect of harvesting stage
475 on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in western Kenya. *Sci World J* **2017**,
476 *2017*, <https://doi.org/10.1155/2017/8249532>.

- 477 48. Cole, M. R.; Eggleston, G.; Petrie, E.; Uchimiya, S. M.; Dalley, C. Cultivar and maturity effects on the
478 quality attributes and ethanol potential of sweet sorghum. *Biomass bioenergy* **2017**, *96*, 183–192,
479 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.001>.
- 480 49. Mizuno, H.; Kasuga, S.; Kawahigashi, H. The sorghum SWEET gene family: stem sucrose accumulation as
481 revealed through transcriptome profiling. *Biotechnol biofuels* **2016**, *9*, 127,
482 <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0546-6>.
- 483 50. Fabendon, M. B.; Elendi, R.; Santoso, S. B.; Prastowo, B. Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2
484 and its equipment for bioethanol in Indonesia. In IOP Conference Series: Earth Environmental Science, Sci.
485 317 Trans 2017, Bogor, Indonesia, 10–11 October 2017; IOP Publishing: Volumen 65, pp. 012054.
- 486 51. Roy, P.; Basu, S.; Chatterjee, J.; Goswami, A.; Barik, S. Response of Various Yield of Sweet Sorghum Crop
487 (*Sorghum bicolor* L. Moench) to Different Levels of Fertilizer in Lateritic Soil of Birbhum, West Bengal.
488 *Int J Agric Environ Biotechnol* **2018**, *11*, 25–32, DOI: [10.30954/0974-1712.2018.00178.3](https://doi.org/10.30954/0974-1712.2018.00178.3).
- 489 52. Nokerbekova, N. K.; Zavalin, A. A.; Sulaimonov, Y. T.; Zhapayev, R. K. The Nutrition Influence of
490 Nitrogen Fertilizers on the Sugar Content of Sweet Sorghum Plants in the Southeast of Kazakhstan.
491 *Russian agricultural sciences* **2018**, *44*, 25–30, <https://doi.org/10.3103/S1068367418010147>.
- 492



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

493

Apéndice 3

BioEnergy Research

Evaluation in the conversion to bioethanol of the ROGER sweet sorghum variety --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Evaluation in the conversion to bioethanol of the ROGER sweet sorghum variety
Article Type:	Original Research
Keywords:	Energy crop; Fertilizer; Biofuels; Tillage; Soil
Corresponding Author:	Guadalupe Gutiérrez-Soto Universidad Autonoma de Nuevo Leon Campus de Ciencias Agropecuarias, Escobedo, Nuevo Leon MEXICO
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad Autonoma de Nuevo Leon
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Iosvany López-Sandin
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Iosvany López-Sandin Francisco Zavala-García Laura Levin, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universi Héctor A. Ruiz Carlos E. Hernández-Luna Guadalupe Gutiérrez-Soto
Order of Authors Secondary Information:	
Funding Information:	
Abstract:	Sweet sorghum [<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench] is a promising crop in bioethanol production due to its high amounts of juice, biomass and fermentable sugar content. As well as, due to its ability to adapt to different production conditions and to the easy extraction of the juices from the stem. The objective of this study was to determine the production method of the ROGER sweet sorghum variety with the highest yield of in the sugars conversion to bioethanol. The methods consisted of the combination of different tillage techniques and fertilizers types. The results showed that the highest values of stem yield (44.29 t/ha), juice (25.56 m ³ /ha), Brix degrees (16.92%) and ethanol (2.12 m ³ /ha) were obtained under the combination of traditional plowing with breaking of the plow layer and organic fertilizer. In addition, the juice allowed the growth of the yeast without the need for supplementation or addition of nutrients and subsequently the conversion to ethanol.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62

1 Evaluation in the conversion to bioethanol of the ROGER sweet 2 sorghum variety

3 Iosvany López-Sandin^{1, 2}, Francisco Zavala-García¹, Laura Levin³, Héctor A. Ruiz⁴, Carlos E. Hernández-
4 Luna⁵, Guadalupe Gutiérrez-Soto¹.

5 ¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Francisco Villa S/N Col. Ex Hacienda El Canadá,
6 66415, General Escobedo, N.L., México

7 ² Dpto. de Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila, Carretera a Morón,
8 Km 9 1/2, 69450 Ciego de Ávila, Cuba

9 ³ Micología Experimental, Dpto. de Biodiversidad y Biología Experimental, Facultad de Ciencias Exactas y
10 Naturales, Universidad de Buenos Aires, 1428, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

11 ⁴ Biorefinery Group, Food Research Department, Faculty of Chemistry Sciences, Autonomous University of
12 Coahuila, 25280 Saltillo, Coahuila, México

13 ⁵ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Pedro de Alba S/N., Ciudad
14 Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

15 * Correspondence: ggutierrez0402@gmail.com; Tel.: +52-83294000 Ext. 3500

16 Abstract

17 Sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is a promising crop in bioethanol production due to its high amounts
18 of juice, biomass and fermentable sugar content. As well as, due to its ability to adapt to different production
19 conditions and to the easy extraction of the juices from the stem. The objective of this study was to determine the
20 production method of the ROGER sweet sorghum variety with the highest yield of in the sugars conversion to
21 bioethanol. The methods consisted of the combination of different tillage techniques and fertilizers types. The results
22 showed that the highest values of stem yield (44.29 t/ha), juice (25.56 m³/ha), Brix degrees (16.92%) and ethanol
23 (2.12 m³/ha) were obtained under the combination of traditional plowing with breaking of the plow layer and organic
24 fertilizer. In addition, the juice allowed the growth of the yeast without the need for supplementation or addition of
25 nutrients and subsequently the conversion to ethanol.

26 **Key words:** Energy crop, Fertilizer, Biofuels, Tillage, Soil

27 Introduction

28 Bioethanol has gained value compared to other biofuels. Being the most used in regulated mixtures with gasoline
29 and, therefore, a viable source of alternative energy that contributes to reducing the consumption of fossil fuels and
30 the pollutants emissions into the atmosphere [1, 2]. It can be obtained from different raw materials, particularly those
31 that contain sugar and are classified as first-generation bioethanol, which are derived mainly from agricultural crops
32 for food, among which we can mention sugar cane, corn, sorghum, barley, wheat and cassava. For its part, the
33 second and third generation bioethanol is obtained from lignocellulosic materials and from algal biomass,

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

34 respectively [3]. However, first generation production is more economical, since the juices have fermentable sugars
35 available without the need for pre-treatment [4].

36 A promising agricultural crop for obtaining first generation bioethanol is sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.)
37 Moench], a short-cycle C4 plant with high biomass and sugar production with low demand for inputs and water,
38 allowing its adaptation to marginal lands and affected by drought. Moreover, it has the capacity to produce fuel
39 without affecting the food supply, helping to mitigate the food security conflict [5, 6]. Sweet sorghum is considered
40 the fifth most important cereal crop in the world and the food sustenance of millions of people, mainly in
41 underdeveloped countries [7].

42 The sweet sorghum potential has contributed to the development of new varieties in obtaining bioethanol,
43 considering the most efficient route in terms of conversion. The first-generation bioethanol yield can be affected
44 (among other factors) by the accumulation of juice and sugar in the stem of the plant. Which depends on the varieties
45 and production conditions [6, 8, 9], as well as post-harvest management of plant material [10]. Based on the above,
46 the objective of this study was to determine the production method of the ROGER sweet sorghum variety with the
47 highest yield of conversion to bioethanol.

48 **Materials and methods**

49 **Vegetable material**

50 The juices used in the conversion to bioethanol come from the ROGER sweet sorghum variety established under
51 different agronomic treatments shown in Table 1. The treatments were established under a randomized complete
52 block design with arrangements in divided plots with three repetitions. The variety is registered in the SAGARPA
53 Catalog of Plant Varieties with the code SOG - 261 - 050315. The plant material was produced in the Marín
54 experimental field belonging to the Faculty of Agronomy of the Autonomous University of Nuevo León.
55 Geographically it is located at 25° 52' 13.5" north latitude and 100° 02' 22.56" west longitude, with an altitude of
56 355 masl. The climate corresponds to a BS1 (h') hw (e'), described as warm steppe dry climate with summer rains,
57 precipitation and annual average temperatures of 595 mm and 22°C, respectively. The predominant soil in the area is
58 compacted vertisol with a high content of clay and calcium carbonate, a pH range between 7.5-8.5 and low organic
59 matter content. Under these conditions and with a planting density of 18 plants/m², the variety is characterized by an
60 average of 75 days for flowering, 2.4 m in height of the plant, 45 t/ha of fresh biomass and a cultivation cycle of 130
61 days.

62 **Obtaining the juice**

63 To obtain the juices, 200 stems were ground by treatment in a sugar cane mill. The juices were sieved to measure the
64 content of total soluble solids or Brix degrees, the juice weight (JW) and the juice volume (JV). Brix degrees were

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

65 measured with a digital portable refractometer (ATAGO® 3810, PAL-1, Atago USA Inc., Bellevue, USA). In
66 addition to, the loss of the Brix degrees was estimated for the time elapsed between the extraction of the juices and
67 the fermentation. The juice extraction efficiency (JEE) of the mill was determined according to the following
68 equations [11, 12]:

$$69 \quad JEE (\%) = \frac{JW}{JTW} \times 100 \quad (1)$$

70 Where JW (kg) is the extracted juice weight and JTW (kg) is the juice total weight contained in the stem that was
71 determined by the following equation:

$$72 \quad JTW (kg) = SFW - BDW \quad (2)$$

73 Where SFW (kg) is the stem fresh weight and BDW (kg) is the bagasse dry weight obtained after the mulling of the
74 stem, dried in a forced air stove (HAFO® 1600 series, USA) at 65°C until reach a constant weight.

75 Bagasse moisture content (BMC) was determined according to the following equation:

$$76 \quad BMC (\%) = \frac{BFW - BDW}{BFW} \times 100 \quad (3)$$

77 Where BFW (kg) is the bagasse fresh weight obtained from mulling the stem.

78 Inoculum preparation

79 The *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 strain was used, which was maintained in PDA medium by periodic reseeded
80 every three months and stored at 4°C. The inoculum was prepared in PDB medium, previously sterilized at 121° C
81 for 15 min. Before each test, the cultures were incubated at 30°C and shaken at 150 rpm for 24 h.

82 Bioethanol production

83 In 500 mL Erlenmeyer flasks, 200 mL of the juices were placed and sterilized at 121°C for 20 min. Culture media
84 were inoculated at 2% (v/v) and incubated for 72 h at 30°C under shaking conditions at 150 rpm on an incubator
85 shaker (New Brunswick Scientific Co. G 25 Inc., Edison, NJ, USA). Changes in pH, Brix degrees, sugars (RS)
86 concentration reducing, biomass production (BP) and the juice concentration of ethanol (JEC) were determined at 0,
87 24, 48 and 72 h of fermentation. All tests were performed in triplicate. The pH measurement was made with a
88 potentiometer (Coming® pH meter 430, USA). The RS quantification was performed by the method described by
89 Miller [13], using glucose as standard. Samples were taken from the fermentation broth and centrifuged at 14000
90 rpm for 10 min. Subsequently, 0.1 mL of the supernatant was taken and 0.1 mL of 3,5-Dinitrosalicylic Acid (DNS)
91 was added. The reaction for the sugars determination was carried out for 5 min at 100°C and then immersed in an ice

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

92 bath for 5 min. Finally, 1 mL of distilled water was added, and the reaction mixtures were measured as such at 540 in
93 a spectrum Shimadzu® UV-Vis 1800 (Japan). The cultures were filtered through Whatman N° 1 filters (previously
94 weighed) to calculate the BP and recover the supernatants for the quantification of bioethanol. The filters with the
95 recovered biomass were placed in an oven (HAFO® 1600 series, USA) at 60°C until reaching a constant weight. To
96 estimate the juice ethanol yield (JEY), 100 mL of the supernatants were taken and placed in a rotavapor (IKA® RV
97 10 Digital, China) at 30°C, 132 mbar and 50 rpm for a period of 40 min. The distillate obtained from the rotavapor
98 was used to determine ethanol concentration using the potassium dichromate method [14, 5]. Fermentation efficiency
99 (FEE) and volumetric productivity ethanol (EVP) were determined according to the following equations [15, 16]:

$$100 \quad FEE (\%) = \frac{JEY}{JTEY} \times 100 \quad (4)$$

101 Where JEY (m³/ha) is the juice ethanol yield (equation 6) and JTEY (m³/ha) is the juice theoretical ethanol yield
102 (equation 7).

$$103 \quad EVP (g/L/h) = \frac{JEC}{t} \quad (5)$$

104 Where JEC (g/L) is the juice ethanol concentration and *t* (h) is the fermentation time that provides the highest ethanol
105 concentration for discontinuous fermentations.

106 The juice ethanol yield (JEY) was determined according to the following equation [17]:

$$107 \quad JEY (m^3/ha) = \frac{EV}{JV} \times JY \quad (6)$$

108 Where: EV (m³) is the ethanol volume, JV (m³) is the juice volume and JY (m³/ha) is the juice yield.

109 **Bioethanol production theoretical**

110 The theoretical ethanol yield was determined using the methodology described by Yang et al. [18], based on the
111 advanced solid-state fermentation technology (ASSF) reported by Li et al. [19]. The juice theoretical ethanol yield
112 (JTEY) was determined according to the following equation:

$$113 \quad JTEY (m^3/ha) = 0.07911 \times FSY \quad (7)$$

114 Where 0.07911 (m³/t) is the juice conversion factor to fuel ethanol and FSY (t/ha) is the fresh stem yield.

115 The grain ethanol theoretical yield (GETY) was determined according to the following equation:

$$116 \quad GETY (m^3/ha) = 0.43038 \times GY \quad (8)$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63

117 Where 0.43038 (m³/t) is the grain to fuel ethanol conversion factor and GY (t/ha) is the grain yield.

118 The ethanol total theoretical yield (ETTY) was determined according to the following equation:

$$119 \quad \text{ETTY (m}^3/\text{ha)} = \text{JETY} + \text{GETY} \quad (9)$$

120 **Statistical analysis**

121 The data obtained was processed in the IBM SPSS Statistics for Windows statistical software. The significant
122 minimum difference was determined by analysis of variance (ANOVA, $p < 0.05$). The results were expressed as the
123 mean values \pm SD. Tukey's test ($p < 0.05$) and Pearson coefficient ($p < 0.05$) were used to separate means and
124 correlation analysis, respectively.

125 **Result and discussion**

126 **Fresh stem weight, fresh stem yield, bagasse moisture content, and juice extraction**
127 **efficiency**

128 The results (Table 2) revealed a significant difference ($p < 0.01$; $p < 0.05$) between treatments for fresh stem weight
129 (FSW), FSY and BMC, but not for JEE ($p > 0.05$). The highest value of FSW (246.04 g/plant) and FSY (44.29 t/ha)
130 was observed in T7. Indicating a high effectiveness of the treatment that favors the variety production conditions,
131 thus increasing yields in a range of 2.31 to 11.77 t/ha. In addition to, exceed the values obtained in other sweet
132 sorghum varieties with reports of 27.4 and 18.17 t/ha [17, 20]. Although, these last authors report a higher FSW with
133 677.76 g/plant, suggesting that its variation may depend on the production conditions (density of plantation, tillage
134 and fertilization).

135 The results indicated a direct relationship between BMC and JEE that was evidenced with its high negative
136 correlation ($p < 0.01$) (Table 3). The lowest BMC value (20.51%) was observed in T7 (statistically equal to T4,
137 Table 2) and, consequently, this same treatment showed the highest JEE value (40.21%). These parameters are
138 directly linked to the loss of juice during grinding. Thus, BMC had a negative correlation ($p \leq 0.05$) with JW and JV
139 (Table 3). While, JEE was correlated ($p < 0.01$) positively with JW and JV, indicating that the increase in JEE
140 decreases the juice loss and increases its yields. The oscillations between treatments could be attributed to the
141 specific effect of each production method on the sorghum plant, thus varying the juice and fiber content of the stem
142 [21] and the JEE. This suggests that high fiber content may decrease JEE [22]. In this sense, the average valor JEE
143 (34.85%) was lower than the range of 38.91 to 45.7% reported in other sweet sorghum varieties [17, 23], suggesting
144 a low JEE of the mill and , therefore, a disadvantage in the process of obtaining the juice.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

145 Juice weight, juice volume and Brix degrees

146 JW, JV, JY and Brix degrees showed a significant difference ($p < 0.01$; $p < 0.05$) between treatments (Table 4). The
147 maximum value of JW (146.09 g/plant), JV (25.56 m³/ha) and Brix degrees (16.65%) were observed in T7. Where,
148 JW and Brix degrees presented a high positive correlation ($p < 0.01$), not so, between JV and Brix degrees ($p > 0.05$;
149 Table 3). The relationship that had JW and JV with FSW, BMC and JEE was consistent with that obtained by Shukla
150 et al. [24] and Rono et al. [17]. On the other hand, the Brix degrees were positively correlated ($p < 0.01$) with FSW,
151 coinciding with what was reported by Mekdad and Emam [23]. While Shukla et al. [24] and Rono et al. [17] they did
152 not observe correlation between these. The first authors describe a behavior similar to ROGER (>70 days for
153 flowering) in sweet sorghum plants with early flowering (<70 days for flowering), indicating that these parameters
154 could be associated with the plant cycle. On the other hand, shredding the stems has been recommended, eliminating
155 only the panicle. Helping to reduce harvest times and thus, the deterioration of stem sugars in field environmental
156 conditions. Since sweet sorghum compared to other crops such as sugar cane, removing the leaves and pod is slow
157 [10], although leaving the pod on the stem and only removing the leaf blade may be considered.

158 Compared to other sweet sorghum varieties, the JW results were in the reported range of 32.7 to 299.7 g/plant [25]
159 and exceed the reported range by Bakhite et al. [26] from 3.10 to 54.73 g/plant. Furthermore, JY is greater than the
160 values obtained by da Silva et al. [27] and Maw et al. [9] of 12.01 and 15.5 m³/ha, respectively. As for the Brix
161 degrees, they were in the reported range of 6.66 to 18.5% [25, 26] (Bandara *et al.*, 2019; Bakhite *et al.*, 2019).
162 Moreover, the ROGER variety is consistent with other varieties grown in different tropical environments in Mexico,
163 which have reported SVJ and Brix degrees of 26.2 m³/ha and 17%, respectively [28].

164 In general, the maximum productivity was obtained with T7, which could be explained by the tillage and fertilizer
165 influence on soil properties [23, 29]. In this sense, the subsoil operation allows breaking the plow layer formed by
166 the continuous passing of machinery on the ground, thus decreasing the apparent density and resistance to
167 penetration. This increases the degree of water infiltration, its storage in the deep layers and the photosynthetic
168 capacity of plants [30]. Therefore, a deep tillage operation is recommended at the beginning of the crop cycle to
169 decrease the resistance of the soil to the penetration of the roots and help in the conservation of its moisture, thus
170 promoting greater roots development and its exploration area. In addition to increasing the availability of water and
171 nutrients for plants, resulting in greater growth and adaptability in different terrain conditions [31-34]. On the other
172 hand, it is known that sweet sorghum has a low demand for nitrogen that could be supplied through crop rotation
173 with legumes, without affecting its yields [35, 29]. Also, differences in the responses of plants to different doses of
174 nitrogen have been reported [36, 9]. As for organic fertilizer, it can increase the accumulation of stable carbon in the
175 surface layers of the soil, the concentrations and proportions of labile carbon, in addition to improving the
176 aggregation and reuse of nutrients in the soil [37, 38]. Thus, organic fertilizers can positively impact soil properties,
177 increasing the quantity and availability of nutrients and water retention [39, 34].

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

178 Brix degrees in function of time elapsed after the extraction of the juice

179 The transport ($\approx 25^{\circ}\text{C}$ for 12 h) and storage ($\approx -20^{\circ}\text{C}$ for 24 h) time of the juices after the grinding of the stems and
180 until their fermentation reduced the Brix degrees in a range of 3.79 to 13.48% with respect to the original percentage,
181 suggesting that juices have high fermentation capacity without the addition of enzymes [40]. It is known that after
182 milling the juice can be preserved without decomposing for 4 or 5 hours at room temperature [41], due to the high
183 content of fermentable sugars and its rapid degradation by the metabolic activities of contaminating bacteria [41, 42].
184 Furthermore, the sorghum production method can influence the degree of decomposition of the juice, losing up to
185 20% of the fermentable sugars in three days at room temperature. However, these risks can be reduced by
186 refrigerating the juice (Wu *et al.*, 2010) or by adding chemical preservatives [41]. Nevertheless, it has been reported
187 that the freezing of the juice can modify its chemical composition and subsequent obtaining of bioethanol [43].
188 Therefore, it is important to reduce the time from the juice obtaining to its fermentation. Once identified some of the
189 factors that can affect the juice quality, the fermentation process was preceded. Considering that the yield and the
190 ethanol final concentration depend of the fermentation kinetics. The latter depends on time, temperature, yeast load,
191 stirring conditions, pH of the medium and the concentration of solids in the juice [44-46].

192 pH in function of fermentation time

193 Fig. 1 shows the behavior pH in the fermentation medium. Significant difference ($p < 0.05$) was observed between
194 treatments and during the fermentation, decreasing with increasing time. The initial pH decreased generally in a
195 range from 4.94 (T9) to 4.0 (T5), equivalent to 19.03%. T7 and T8 showed a higher decrease in the first 24 h,
196 behavior similar to that mentioned by Laopaiboon *et al.* [46] and Phukoetphim *et al.* [47]. The rest of the treatments
197 had a gradual decrease throughout the process, coinciding with that reported by Akin *et al.* [48]. The pH variations
198 can be explained (among other factors) to the effect of the production treatment. However, a wide pH range (3.9 to
199 6.5) has been reported in the fermentation process of sorghum juice, which depends on the medium conditions and
200 the yeast used [4, 45, 49, 50].

201 Brix degrees and reducing sugars in fermentation time function

202 The Brix degrees and RS results showed a significant difference ($p < 0.05$) between treatments and fermentation
203 times (Fig. 2).

204 T7 showed the highest initial values of Brix degrees and RS (Fig. 2 a and b), which decreased from 14.9 to 6% and
205 from 127.7 to 36.8 g/L, respectively, at 72 h. However, in the first 48 hours the higher decrease was observed in
206 55.03 and 60.53%, respectively. This indicated a higher yeast activity in this period. In general, all treatments had the
207 same behavior. Conventionally, the content and types of fermentable sugars in the juice have been positively related
208 to Brix degrees [51, 52, 8]. However, analytical techniques are necessary for its determination [15]. Since the
209 behavior of T9 can occur, which showed an initial value of Brix degrees (13.8%) only exceeded by T7 and T8 (Fig. 2

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

210 a) but, it had the lowest initial content of SR with 61.2 g/L (Fig. 2 b). Suggesting that Brix degrees are not an
211 absolute indicator for predicting the content and types of sugars present in sweet sorghum juice, also varying
212 between genotype and production conditions [10]. Thus, no correlation ($p > 0.05$) was observed between the Brix
213 degrees and RS (Table 5).

214 **Biomass production, concentration and ethanol yield of the juice in fermentation time**
215 **function**

216 BP showed exponential growth after inoculation of the juice of each treatment (Fig. 2 c), without going through the
217 adaptation phase (Lag). This Indicated high yeast activity [47], as well as the absence of compounds with levels that
218 inhibited yeast development [16, 53], reflecting in a higher concentration of ethanol (Fig. 2 d). The highest values of
219 JEC (66.31 g/L) and BP (113.1 g/L) were obtained in T7, with a high positive correlation ($p < 0.01$) between these
220 parameters (Table 5). In the first 48 h of fermentation, an increase in BP and JEC of 50.55% and 57.72%,
221 respectively, was observed. This behavior was shown in in most treatments. After 48 h, a marked decrease in BP and
222 JEC level was observed, suggesting the start of the stationary phase of yeast growth and accorded with that reported
223 by Kumar et al. [41]. Commonly, the ethanol production curve with *S. cerevisiae* (cultivated in sweet sorghum
224 juices) is characterized by three phases, the logarithmic (exponential) phase that occurs during the first 18 h of
225 incubation, the slow phase from 18 to 24 h and the stationary phase from 24 to 72 h [54]. As observed in T1, T2 and
226 T3. However, in treatments like T7 (with high sugar content), the exponential phase was extended for a longer time,
227 suggesting that the origin of the juice influences its chemical composition. Which will be evaluated in future
228 research. It is worth mentioning that sweet sorghum juice with minimal nutrient inputs is capable of allowing yeast
229 development and, therefore, ethanol production [43]. JEC exceeds the value (39.2 g/L) obtained under mixed culture
230 in supplemented juices of the sweet sorghum varieties GK-Coba, Mn 1054, Ramada, Mn4508 and SS-301,
231 inoculated with *S. cerevisiae* ATCC 7754 and *Z. mobilis* ATCC 29191 [5]. Therefore, the results obtained suggest a
232 high conversion of sugars to ethanol. JEC could be improved by increasing FEE (Table 6), considering the high
233 positive correlation between these ($p < 0.01$; Table 5). Likewise, FEE showed a positive correlation ($p < 0.05$) with
234 Brix degrees. However, the latter is not significantly related ($p > 0.05$) to the JEC. This confirmed that the Brix
235 degrees should not be considered an absolute indicator to estimate the JEC. However, FEE can be increased by
236 concentrating the juice [55] or enriching it through supplementation with nutrients or by using other production
237 techniques, such as very high gravity fermentation [56, 15, 47]. On the other hand, EVP showed a high positive
238 correlation ($p < 0.01$) with JEC and FEE. Regarding EVP, a wide range has been reported that ranges from 1.14 to
239 3.36 g/L/h [47, 55], surpassing that obtained in our study (Table 6). On the other hand, JEY had a high positive
240 correlation ($p < 0.01$) with JEC, FEE and EVP (Table 5). Although FEE did not reach 70%, the higher JEY value
241 (2.12 m³/ha) obtained in T7 (Table 6) exceeded the report by Khalil et al. [5] of 1,318 m³/ha. Suggesting that the
242 ethanol yield is associated with the origin of the juice (production conditions) and the microorganism used in the
243 fermentation. In general, the observed differences between treatments for the analyzed parameters can be attributed

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

244 to variations in the juice chemical properties. However, the fermentation process and the factors that can affect its
245 efficiency must be studied in more detail.

246 Ethanol theoretical production

247 As a complement, the ethanol theoretical production was determined (Table 6). The ethanol theoretical yield was
248 observed to vary between treatments ($p < 0.05$). T7 showed the higher values of JTEY, GETY and ETTY with 3.15,
249 2.61 and 5.76 m³/ha, respectively. In general, the ethanol juice obtained represented 53.64% of the ETTY, suggesting
250 an advantage of the production of first-generation bioethanol from the juice. In addition to not requiring complex
251 operations to obtain it, as occurs with grain and in second generation processes [57].

252 Conclusions

253 The results obtained in this study indicate that the specific characteristics of the ROGER sweet sorghum variety
254 associated with obtaining bioethanol, such as the stem yield, juice and Brix degrees vary according to production
255 method. Thus, the method integrated by traditional tillage with breakage of the plow layer and organic fertilizer had
256 the highest values for these traits. Fermentation kinetics showed that the substrate (juice) allows yeast development,
257 without the need for supplementation or addition of nutrients. In addition to having high sugars concentrations that
258 allowed high conversion yields to bioethanol, and therefore demonstrates the potential of this variety in the
259 production of biofuels.

260 Acknowledgments

261 To the Autonomous University of Nuevo León for the support of this research.

262 Conflict of Interest

263 The authors declare no conflict of interests.

264 References

265 1. Xuan TD, Phuong NT, Khang DT, Khanh TD (2015) Influence of sowing times, densities, and soils to biomass
266 and ethanol yield of sweet sorghum. Sustainability 7:11657-11678. <https://doi.org/10.3390/su70911657>
267 2. Azhar SHM, Abdulla R, Jambo SA, Marbawi H, Gansau JA, Faik AAM, Rodrigues KF (2017) Yeasts in
268 sustainable bioethanol production: A review. Biochem Biophys Rep 10:52-61.
269 <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
270 3. Baeyens J, Kang Q, Appels L, Dewil R, Lv Y, Tan T (2015) Challenges and opportunities in improving the
271 production of bio-ethanol. Prog Energ Combust Sci 47:60-88. <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2014.10.003>

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

4. Zabed H, Faruq G, Sahu JN, Azirun MS, Hashim R, Nasrullah Boyce A (2014) Bioethanol production from fermentable sugar juice. *The Scientific World Journal* 2014:1-11. <https://doi.org/10.1155/2014/957102>

5. Khalil SR, Abdelhafez AA, Amer EAM (2015) Evaluation of bioethanol production from juice and bagasse of some sweet sorghum varieties. *Annals of Agricultural Sciences* 60:317-324. <https://doi.org/10.1016/j.aaoas.2015.10.005>

6. Pabendon MB, Efendi R, Santoso SB, Prastowo B (2017, May) Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2 and its equipment for bioethanol in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 65, No. 1, p. 012054). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/65/1/012054>

7. Mar NN, Linn K, Wai HP, Mon H, Soe AA, Minn M (2019) Efficiency of Different N, P, K Fertilizer Application Methods in Sorghum to Optimize Marginal Land Productivity. *Science* 4:511-515. <https://www.irjaes.com/pdf/V4N2Y19-IRJAES/IRJAES-V4N2P663Y19.pdf>

8. Cole MR, Eggleston G, Petrie E, Uchimiyi SM, Dalley C (2017) Cultivar and maturity effects on the quality attributes and ethanol potential of sweet sorghum. *Biomass and Bioenergy* 96:183-192. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.001>

9. Maw MJ, Houx JH, Fritschi FB (2019) Nitrogen Content and Use Efficiency of Sweet Sorghum Grown in the Lower Midwest. *Agron J* 111:2920-2928. [10.0386/agron.2018.08.0489](https://doi.org/10.0386/agron.2018.08.0489)

10. Rao SS, Patil JV, Reddy DC, Kumar BV, Rao PS, Gadakh SR (2013) Effect of different crushing treatments on sweet sorghum juice extraction and sugar quality traits in different seasons. *Sugar Tech* 15:311-315. <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0220-2>

11. Adewole KA, Adamolekun MT, Akinmisi R (2015) Development of a Sugarcane Juice Extractor for Small Scale Industries. *Development* 2:1169-1173. <http://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42350769.pdf>

12. Olaoye JO (2011) Development of a sugarcane juice extractor for small scale industries. *Journal of Agricultural Technology* 7:931-944. <https://pdfs.semanticscholar.org/693c/258efcf0e21c97a400d19e1727e2de141717.pdf>

13. Miller, G. L. (1959) Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal Chem* 31:426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>

14. Crowell EA, Ough CS (1979) A modified procedure for alcohol determination by dichromate oxidation. *Am J Enol Viticult* 30:61-63. <https://www.ajevonline.org/content/30/1/61>

15. Appiah-Nkansah NB, Zhang K, Rooney W, Wang, D (2018) Ethanol production from mixtures of sweet sorghum juice and sorghum starch using very high gravity fermentation with urea supplementation. *Ind Crop Prod* 111:247-253. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.028>

16. 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 J Microbiol Biotechnol* 23:1497-1501. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9383-x>

17. Rono JK, Cheruyot EK, Othira JO, Njuguna VW (2018) Cane Yield and Juice Volume Determine Ethanol Yield in Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *International Journal of Applied Science* 1:29-36. <https://doi.org/10.30560/ijas.v1n2p29>

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

18. Yang X, Li M, Liu H, Ren L, Xie G (2018) Technical Feasibility and Comprehensive Sustainability Assessment of Sweet Sorghum for Bioethanol Production in China. *Sustainability* 10:731. <https://doi.org/10.3390/su10030731>

19. Li S, Li G, Zhang L, Zhou Z, Han B, Hou W, Li T (2013) A demonstration study of ethanol production from sweet sorghum stems with advanced solid state fermentation technology. *Appl Energy* 102:260-265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.060>

20. Yoosakyingsataporn S, Detpiratmongkol S (2019) Effects of ethephon on growth and yield of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) at different growth stages. *Plant Physiol* 10:2987-2887. [10.22034/iipp.2019.670785](https://doi.org/10.22034/iipp.2019.670785)

21. Rajendran C, Ramamoorthy K, Backiyarani S (2000) Effect of deheading on juice quality characteristics and sugar yield of sweet sorghum. *J Agron Crop Sci* 185:23-26. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2000.00386.x>

22. Gnansounou E, Dauriat A, Wyman CE (2005) Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. *Bioresour Technol* 96:985-1002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.015>

23. Mekdad A, Emam S (2019) Biofuel, Sugar Content, Grain Yields and Qualities of Two Sorghum bicolor in Responses to Levels and Timing of Nitrogen Applications. *Egypt J Agron* 41:105-117. [10.21608/egro.2019.10075.1152](https://doi.org/10.21608/egro.2019.10075.1152)

24. Shukla S, Felderhoff TJ, Saballos A, Vernerris W (2017) The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crop Res* 203:181-191. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>

25. Bandara AY, Weerasooriya DK, Gobena DD, Hopper DJ, Tesso TT, Little CR (2019) Improving sweet sorghum for enhanced juice traits and biomass. *Plant Breeding* 139:131-140. <https://doi.org/10.1111/pbr.12764>

26. Bakhite MAE, Badawi GH, Odindo A, Magwaza LS (2019) Assessment of The Effects of Winter Condition on Sweet Sorghum Yield and Sugar Content. *TURJAF* 7:166-172. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i2.166-172.1888>

27. da Silva TM, de Oliveira AB, de Moura JG, da Trindade Lessa BF, de Oliveira LSB (2019) Potential of Sweet Sorghum Juice as a Source of Ethanol for Semi-arid Regions: Cultivars and Spacing Arrangement Effects. *Sugar Tech* 21:145-152. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0637-8>

28. Montes-García N, Uribe-Gómez S, Cisneros-López M, Pecina-Quintero V, Moreno-Gallegos T, Díaz-Franco A (2019) RB-PIRULÍ: variedad de sorgo dulce para la producción de biomasa y azúcares en México. *Rev Fitotec Mex* 42:75-77. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000100075&script=sci_arttext&tlng=en

29. Han KJ, Alison M (2020) Cover crop and tillage affect sweet sorghum production and soil chemical properties. *Agron J* 112:107-116. <https://doi.org/10.3234/agj2.20038>

30. Zhai Z, Li YY, Zhang L, Pang B, Pang HC, Wei BH, Qi SW (2017) Effects of short-term deep vertically rotary tillage on topsoil structure of lime concretion black soil and wheat growth in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Chin J Appl Ecol* 28:1211-1218. [10.13287/j.1001-9332.201704.016](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201704.016)

1
2
3
4 345
5
6 346
7 347
8
9 348
10 349
11
12 350
13 351
14
15 352
16 353
17
18 354
19 355
20
21 356
22 357
23
24 358
25 359
26
27 360
28 361
29
30 362
31 363
32
33 364
34
35 365
36 366
37 367
38
39 368
40
41 369
42 370
43
44 371
45 372
46
47 373
48 374
49
50 375
51 376
52
53 377
54 378
55
56 379
57 380
58
59 381
60
61 382
62
63
64
65

31. Varsa EC, Chong SK, Abolaji JO, Farquhar DA, Olsen FJ (1997) Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Tillage Res* 43:219-228. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00041-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00041-X)

32. Busscher WJ, Frederick JR, Bauer PJ (2000) Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Sci Soc Am J* 64:999-1003. <https://doi.org/10.2136/sssai2000.643999x>

33. Botta GF, Jorajuria D, Balbuena R, Ressa M, Ferrero C, Rosatto H, Tourn, M (2006) Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Tillage Res* 91:164-172. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.12.011>

34. Janeth C, Karuku GN, Onwonga RN, Kathumo VM (2019) Effects of Tillage Practices and Organic Cropping Systems on the Yield of Sorghum (*sorghum bicolor* L.) and Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L) in Yatta Sub-County, Kenya. *Journal of Agriculture and Sustainability* 12:232-249. <https://www.infinitypress.info/index.php/jas/article/view/1806>

35. Thivierge MN, Chantigny MH, Bélanger G, Seguin P, Bertrand A, Vanasse A (2015) Response to nitrogen of sweet pearl millet and sweet sorghum grown for ethanol in eastern Canada. *Bioenerg Res* 8:807-820. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9558-x>

36. Holou RA, Stevens G (2012) Juice, sugar, and bagasse response of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. M81E) to N fertilization and soil type. *Gcb Bioenergy* 4:302-310. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01126.x>

37. Li J, Wen Y, Li X, Li Y, Yang X, Lin Z, Zhao B (2018) Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil Tillage Res* 175:281-290. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.008>

38. Ghosh A, Bhattacharyya R, Meena MC, Dwivedi BS, Singh G, Agnihotri R, Sharma C (2018) Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol. *Soil Tillage Res* 177:134-144. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.006>

39. Karuku GN, Onwonga RN, Kathumo VM (2018) Effects of Tillage Practices, Cropping Systems and Organic Inputs on Soil Nutrient Content in Machakos County. *Journal of Agriculture and Sustainability* 13:2618-2630. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13444>

40. Ebrahimiqda E, Ogden KL (2018) Evaluation and modeling of bioethanol yield efficiency from sweet sorghum juice. *BioEnergy Res* 11:449-455. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9909-0>

41. Kumar CG, Rao PS, Gupta S, Malapaka J, Kamal A (2015) Chemical Preservatives-Based Storage Studies and Ethanol Production from Juice of Sweet Sorghum Cultivar, ICSV 93046. *Sugar tech* 17:404-411. <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0336-z>

42. Wu X, Staggenborg S, Propheter JL, Rooney WL, Yu J, Wang D (2010) Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. *Ind Crop Prod* 31:164-170. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.006>

43. Bridgers EN, Chinn MS, Veal MW, Stikeleather LF (2011) Influence of juice preparations on the fermentability of sweet sorghum. *Biological engineering transactions* 4:57-67. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38507>

1
2
3
4 383 44. Buruiană CT, Vizireanu C, Furdui B (2018) Bioethanol production from sweet sorghum stalk juice by ethanol-
5 384 tolerant *Saccharomyces cerevisiae* strains: An overview. The Annals of the University Dunarea de Jos of
6 Galati. Fascicle VI-Food Technology 42:153-167.
7 385 <http://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/food/article/view/1153/970>
8 386
9 387 45. Pilap W, Thanonkeo S, Klamrit P, Thanonkeo P (2018) The potential of the newly isolated thermotolerant
10 388 *Kluyveromyces marxiianus* for high-temperature ethanol production using sweet sorghum juice. 3 Biotech
11 8:126. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1161-y>
12 389
13 390 46. Laopaiboon P, Khongsay N, Phuakoeplim N, Laopaiboon L (2019) Ethanol Production from Sweet Sorghum
14 391 Juice Under Very High Gravity Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*: Aeration Strategy and Its Effect on
15 392 Yeast Intracellular Composition. Chiang Mai J Sci 46:481-494.
16 393 <http://www.thaiscience.info/Journals/Article/CMJS/10990589.pdf>
17 394
18 395 47. Phuakoeplim N, Chan-u-tit P, Laopaiboon P, Laopaiboon L (2019) Improvement of bioethanol production from
19 396 sweet sorghum juice under very high gravity fermentation: Effect of nitrogen, osmoprotectant, and aeration.
20 397 *Energies* 12:3620. <https://doi.org/10.3390/en12193620>
21 398
22 399 48. Akin H, Brandam C, Meyer XM, Strehaiano P (2008) A model for pH determination during alcoholic
23 400 fermentation of a grape must by *Saccharomyces cerevisiae*. *Chem Eng Process* 47:1986-1993.
24 401 <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.11.014>
25 402
26 403 49. Lu Y, Voon MKW, Huang D, Lee PR, Liu SQ (2017) Combined effects of fermentation temperature and pH on
27 404 kinetic changes of chemical constituents of durian wine fermented with *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl*
28 405 *Microbiol Biot* 101:3005-3014. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-8043-1>
29 406
30 407 50. Durán MA, Dantur K, Ruiz RM, Romero ER, Zossi S, Gusils C (2018) Effect of the clarification pH of
31 408 sorghum juice on the composition of essential nutrients for fermentation. *FEMS Microbiol Lett* 365:fmv083.
32 409 <https://doi.org/10.1093/femsle/fmv083>
33 410
34 411 51. Guigou M, Lareo C, Pérez LV, Lhuberas ME, Vázquez D, Ferrari MD (2011) Bioethanol production from sweet
35 412 sorghum: Evaluation of post-harvest treatments on sugar extraction and fermentation. *Biomass and Bioenergy*
36 413 35:3058-3062. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.028>
37 414
38 415 52. Maw MJ, Houx III JH, Fritsch FB (2016) Sweet sorghum ethanol yield component response to nitrogen
39 416 fertilization. *Ind Crop Prod* 84:43-49. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.038>
40 417
41 418 53. Bai FW, Anderson WA, Moo-Young M (2008) Ethanol fermentation technologies from sugar and starch
42 419 feedstocks. *Biotechnol Adv* 26:89-105. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.09.002>
43 420
44 421 54. Sarungallo RS, Melawaty L, Djonny M, Bulo L, Mangera L, Pabendon MB, Sarungallo ZL. Fermentation Juice
45 422 Sweet Sorghum Genotip 4-183A using Batch System by Optimizing the Concentration of Inoculum and
46 423 Substrate. The 1st International Conference on Education and Technology (ICETECH) 2019. IOP Conf. Series:
47 424 *Journal of Physics: Conf. Series*1464 (2020) 012050. [10.1088/1742-6596/1464/1/012050/pdf](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1464/1/012050/pdf)
48 425
49 426 55. Rolz C, de León R, de Montenegro ALM (2019) Co-production of ethanol and biodiesel from sweet sorghum
50 427 juice in two consecutive fermentation steps. *Electron J Biotechn* 41:13-21.
51 428 <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.05.002>
52 429
53 430
54 431
55 432
56 433
57 434
58 435
59 436
60 437
61 438
62 439
63 440
64 441
65 442

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

420 56. Nghiem NP, Montanti J, Johnston DB (2016) Sorghum as a renewable feedstock for production of fuels and
421 industrial chemicals. *Bioengineering* 3:75-91. [10.3934/bioeng.2016.1.75](https://doi.org/10.3934/bioeng.2016.1.75)
422 57. Ayodele BV, Alsaffar MA, Mustapa SI (2020) An overview of integration opportunities for sustainable
423 bioethanol production from first-and second-generation sugar-based feedstocks. *J Clean Prod* 245:18857.
424 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118>

Figures

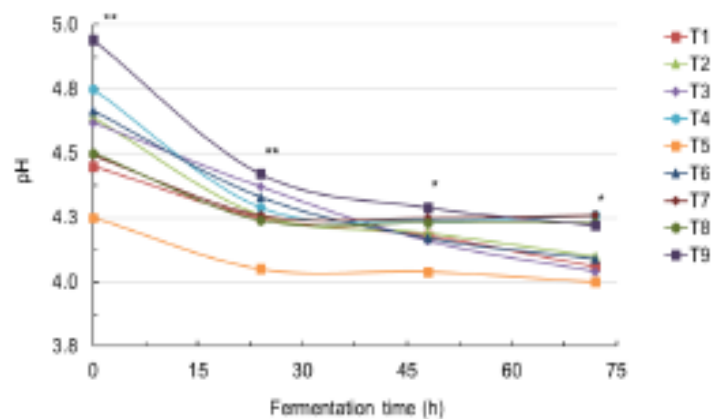


Fig. 1 Change in the pH of the culture. **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

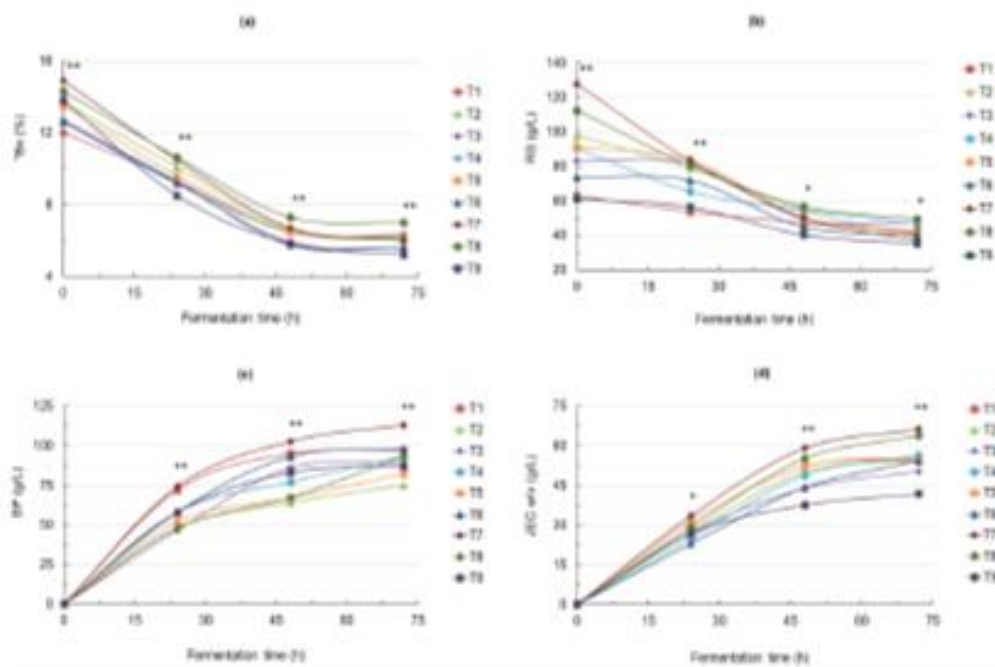


Fig. 2 Juice fermentation profile. (a) °Bx = Brix degrees or total soluble solids content; (b) RS = reducing sugars; (c) BP = biomass production; (d) JEC = juice ethanol concentration (w/v). **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

Table 1 Composition and specifications of agronomic treatments.

Tx	Composition
1	L1 + F1
2	L1 + F2
3	L1 + F3
4	L2 + F1
5	L2 + F2
6	L2 + F3
7	L3 + F1
8	L3 + F2
9	L3 + F3

Abbreviations: Tx = treatment; L1 = minimum tillage, which included clearing and harrowing (up to 0.20 m depth); L2 = traditional tillage, which included clearing, plowing and harrowing (up to 0.30 m deep); L3 = traditional tillage with breaking of the plow layer, which included clearing, subsoil, plowing and harrowing (up to 0.75 m depth); F1 = organic fertilizer with a dose of 3 t/ha of chicken manure (N: 60 kg/ha; P: 65 kg/ha; K: 75 kg/ha); F2 = inorganic fertilizer (N: 100 kg/ha, P: 50 kg/ha); F3 = without fertilizers.

Table 2 Comparison of means for fresh stalk weight, bagasse moisture content and juice extraction efficiency.

Tx	FSW	FSY	BMC	JEE
	(g/plant)	(t/ha)		(%)
1	202.37 ±24.98 ^{ab}	36.43 ±4.50 ^d	39.33 ±3.97 ^a	33.15 ±2.60 ^a
2	180.67 ±9.11 ^a	32.52 ±1.64 ^a	30.73 ±2.61 ^{bc}	36.27 ±5.74 ^a
3	182.74 ±28.96 ^a	32.89 ±5.21 ^a	26.87 ±10.84 ^{cd}	33.09 ±6.67 ^a
4	220.48 ±15.7 ^{bc}	39.69 ±2.83 ^{bc}	21.91 ±8.81 ^d	38.21 ±5.68 ^a
5	213.03 ±7.04 ^{cd}	38.34 ±1.27 ^{cd}	32.15 ±7.93 ^{bc}	34.70 ±2.69 ^a
6	206.98 ±7.79 ^{cd}	37.26 ±1.40 ^{cd}	35.61 ±4.67 ^{ab}	33.46 ±7.46 ^a
7	246.04 ±27.98 ^a	44.29 ±5.03 ^a	20.51 ±5.25 ^d	40.21 ±6.55 ^a
8	233.21 ±6.87 ^{ab}	41.28 ±1.23 ^{ab}	26.84 ±4.39 ^{cd}	36.32 ±2.45 ^a
9	217.06 ±7.63 ^{bcd}	39.02 ±1.37 ^{bcd}	36.89 ±8.06 ^{ab}	28.25 ±6.7 ^a
Mean	211.40 ±25.29	38.05 ±4.54	30.09 ±8.48	34.85 ±5.66
P- value	0.004	0.004	0.032	0.362

Abbreviations: Tx = treatment; FSW = fresh stem weight; FSY = fresh stem yield; BMC = bagasse moisture content; JEE = mill juice extraction efficiency. *, The means values in the column with a letter in common are not significantly different (Tukey, $p > 0.05$).

Table 3 Correlation coefficient and probability between the associated parameters with obtaining the juice

	FSW	BMC	JEE	JW	JV	^a Bx
FSW	1					
BMC	-0.14	1				
JEE	0.02	-0.84 ^{**}	1			
JW	0.78 ^{**}	-0.75 ^{**}	0.72 ^{**}	1		
JV	0.69 ^{**}	-0.47 [*]	0.66 ^{**}	0.93 ^{**}	1	
^a Bx	0.73 ^{**}	-0.08	0.15	0.61 ^{**}	0.35	1

Abbreviations: FSW = fresh stem weight; JEE = juice extraction efficiency by the mill; BMC: bagasse moisture content; JW = juice weight; JV = juice volume; ^aBx = Brix degrees or total soluble solids content. ^{**}, The correlation is significant at a level of 0.01 (bilateral). ^{*}, The correlation is significant at a level of 0.05 (bilateral).

Table 4 Comparison of means between production treatments for juice weight, juice volume and total soluble solids.

Tx	JW (g/plant)	JV (mL/plant)	JY (m ³ /ha)	°Bx (%)
1	104.56 ±19.79 ^{ade*}	111.13 ±19.33 ^{bcd}	20.03 ±3.47 ^{bcd}	13.87 ±1.53 ^{de}
2	102.55 ±1.61 ^{ade}	92.14 ±5.06 ^{efk}	16.59 ±0.91 ^{efk}	14.95 ±1.64 ^{bc}
3	92.04 ±17.41 ^a	84.82 ±11.01 ^e	15.27 ±1.98 ^e	13.20 ±1.13 ^a
4	125.46 ±11.38 ^b	122.39 ±13.24 ^b	22.03 ±2.36 ^b	14.5 ±0.72 ^{cd}
5	112.58 ±5.91 ^{bc}	103.81 ±8.72 ^{cdk}	18.69 ±1.57 ^{cdk}	15.17 ±1.70 ^{bc}
6	106.76 ±18.52 ^{cd}	99.39 ±20.06 ^{def}	17.89 ±3.77 ^{def}	14.18 ±0.33 ^{cdk}
7	146.09 ±2.10 ^a	141.98 ±3.96 ^a	25.56 ±0.72 ^a	16.92 ±0.67 ^a
8	120.86 ±4.06 ^b	116.09 ±4.86 ^{bc}	20.91 ±0.88 ^{bc}	15.75 ±0.60 ^b
9	97.85 ±21.08 ^{de}	88.32 ±14.15 ^g	15.9 ±4.34 ^g	15.72 ±1.94 ^b
Mean	112.08 ±19.53	106.67 ±21.24	19.20 ±3.82	14.91 ±1.41
P- value	0.004	0.002	0.002	0.017

Abbreviations: Tx = treatment; JW = juice weight; JV = juice volume; JY = juice yield; °Bx = Brix degrees or total soluble solids content. *, The means values in the column with a letter in common are not significantly different (Tukey, $p > 0.05$).

Table 5 Correlation coefficient and probability between the parameters evaluated in obtaining ethanol.

	pH	°Bx	RS	JEC	BP	FEE	EVP	JEY
pH	1							
°Bx	-0.088	1						
RS	0.013	0.095	1					
JEC	0.005	-0.142	-0.730**	1				
BP	-0.008	-0.058	-0.595**	0.812**	1			
FEE	-0.071	0.477*	0.121	0.676**	-0.273	1		
EVP	0.22	0.263	-0.633**	0.937**	-0.612**	0.891**	1	
JEY	0.108	-0.151	-0.692**	0.912**	-0.553*	0.873**	0.789**	1

Abbreviations: pH = hydrogen potential; °Bx = Brix degrees or total soluble solids content; RS = reducing sugars; JEC = juice ethanol concentration; BP = biomass production; FEE = fermentation efficiency; EVP = ethanol volumetric productivity; JEY = juice ethanol yield. **, The correlation is significant at a level of 0.01 (bilateral). *, The correlation is significant at a level of 0.05 (bilateral).

Table 6 Fermentation efficiency, ethanol volumetric productivity and ethanol yield.

Tx	FEE (%)	VEP (g/L/h)	JEY	JTEY	GETY	ETTY
				(m ³ /ha)		
1	55.30 ± 10.75 ^{bc*}	0.77 ± 0.02 ^b	1.38 ± 0.24 ^c	2.52 ± 0.35 ^d	2.59 ± 0.28 ^a	5.12 ± 0.61 ^{bc}
2	50.86 ± 7.78 ^{bcd}	0.75 ± 0.13 ^{bc}	1.13 ± 0.06 ^d	2.22 ± 0.13 ^a	2.52 ± 0.50 ^{ab}	4.73 ± 0.63 ^{bc}
3	43.49 ± 7.87 ^d	0.70 ± 0.19 ^c	0.96 ± 0.12 ^a	2.24 ± 0.41 ^a	1.89 ± 0.24 ^d	4.14 ± 0.43 ^d
4	56.11 ± 7.78 ^b	0.78 ± 0.09 ^b	1.56 ± 0.17 ^b	2.78 ± 0.22 ^{bc}	2.43 ± 0.55 ^{abc}	5.21 ± 0.77 ^b
5	47.71 ± 4.39 ^{cd}	0.76 ± 0.06 ^b	1.27 ± 0.11 ^{cd}	2.68 ± 0.11 ^{cd}	2.46 ± 0.27 ^{ab}	5.13 ± 0.35 ^{bc}
6	47.14 ± 10.74 ^d	0.76 ± 0.08 ^b	1.22 ± 0.25 ^d	2.59 ± 0.12 ^{cd}	2.19 ± 0.23 ^{bcd}	4.78 ± 0.34 ^{bc}
7	68.41 ± 11.21 ^a	0.92 ± 0.03 ^a	2.12 ± 0.06 ^a	3.15 ± 0.40 ^a	2.61 ± 0.32 ^a	5.76 ± 0.59 ^a
8	56.51 ± 3.31 ^b	0.89 ± 0.15 ^a	1.67 ± 0.07 ^b	2.97 ± 0.10 ^{ab}	2.06 ± 0.12 ^{cd}	5.02 ± 0.21 ^{bc}
9	30.29 ± 7.47 ^a	0.58 ± 0.14 ^d	0.83 ± 0.23 ^a	2.74 ± 0.12 ^{bcd}	1.87 ± 0.72 ^d	4.60 ± 0.83 ^{cd}
Mean	50.65 ± 12.10	0.77 ± 0.11	1.35 ± 0.40	2.65 ± 0.36	2.29 ± 0.44	4.94 ± 0.64
P-value	0.002	0.001	0.001	0.004	0.019	0.012

Abbreviations: Tx = treatment; FEE = fermentation efficiency; EVP = ethanol volumetric productivity; JEY = juice ethanol yield; JTEY = juice theoretical ethanol yield; GETY = grain ethanol theoretical yield; ETTY = ethanol total theoretical yield. *, Column means with a letter in common are not significantly different (Tukey, $p > 0.05$).