

Características agronómicas y estabilidad en la producción de bioetanol de sorgo dulce en el noreste de México

Agronomic characteristics and stability in bioethanol production of sweet sorghum in northeastern Mexico

Williams-Alanís, H.¹ , Aranda-Lara, U.² , Arcos-Cavazos, G.³ , Elizondo-Barrón, J.² , Zavala-García, F.⁴ , López-Guzmán J. A.,⁵ , Moreno-Gallegos T.⁵, y Estrada-Virgen, M.O.⁶ 

¹ Ex-Investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P. 88900. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Programa de Sorgo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P. 88900. ³ Ex-Investigador. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Las Huastecas. Carretera Tampico-Cd. Mante Km. 55 Apdo. Postal C-1 Suc. Aeropuerto, Tampico, Tamaulipas, México. CP 89339 ⁴ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, (FAUANL), km 17.5 Carretera Zuzua-Marín, Marín, N. L., México. CP 66700. ⁵ Campo Experimental Valle de Culiacán, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Culiacán-Eldorado Km. 17.5 C.P.80000. Culiacán, Sinaloa, México. ⁶ Unidad Académica de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela Km. 9.5, C.P. 63780. Xalisco, Nayarit, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Elizondo-Barrón, J., Zavala-García, F., López-Guzmán J. A., Moreno-Gallegos T., Estrada-Virgen, M.O. (2025). Agronomic characteristics and stability in bioethanol production of sweet sorghum in Northeastern Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1774. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1774>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: October 11th 2024.

Accepted/Aceptado: February 24th 2025.

Available on line/Publicado: March 19th 2025.

RESUMEN

El sorgo dulce presenta gran potencial para la producción de energía renovable (bioetanol). El objetivo de este estudio fue determinar las características agronómicas y estabilidad en la producción de bioetanol de siete genotipos de sorgo dulce, en nueve ambientes del noreste de México. La evaluación se realizó durante los años 2013 a 2017 en cinco ambientes en Estación Cuauhtémoc, Tamaulipas y cuatro ambientes en Marín, Nuevo León. Los genotipos fueron: Dulcina, Keller, Urja y RB-Cañero (variedades comerciales); (SBB-25 x Keller) 17-1-2-1 y (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (variedades experimentales) y Potrillo (híbrido comercial). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para estimar los parámetros de estabilidad, se utilizó el modelo GGE biplot, que explicó el 85.93 % de la variabilidad total. Las características agronómicas de los materiales fueron aceptables, excepto RB-Cañero; que obtuvo el menor valor de ⁰Brix (9.81) y producción de bioetanol (1237 L ha⁻¹). Los genotipos más estables y con mayor rendimiento de bioetanol fueron: Keller (2935 L ha⁻¹); seguidas por (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (2521 L ha⁻¹), y Urja (3214 L ha⁻¹); El mejor genotipo fue Keller, por su estabilidad, producción de bioetanol, y precocidad.

PALABRAS CLAVE: Biomasa; energías renovables; variedades; *Sorghum bicolor*.

*Corresponding Author:

Ulises Aranda Lara. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Programa de Sorgo. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México C.P. 88900. *aranda.ulises@inifap.gob.mx

ABSTRACT

The sweet sorghum has great potential for the renewable energy production (bioethanol). The present study was designed, whose objective was: to determine the agronomic characteristics and stability in bioethanol production; of seven genotypes of sweet sorghum, in nine environments in northeastern Mexico. The evaluation was carried out during the years 2013 to 2017: in five environments in Estación Cuauhtémoc, Tamps, and four environments in Marín, N.L. The genotypes were: Dulcina, Keller, Urja and RB-Cañero (commercial varieties); (SBB-25 x Keller) 17-1-2-1 and (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (experimental varieties) and Potrillo (commercial hybrid). A randomized complete block experimental design with three repetitions was used. To estimate the stability parameters, the GGE biplot model was used, where 85.93% of the total variability was explained. The agronomic characteristics of the materials were acceptable, except RB-Cañero; which obtained the lowest value of °Brix (9.81) and bioethanol production (1237 L ha⁻¹). The most stable genotypes with the highest bioethanol yield were Keller (2935 L ha⁻¹); followed by (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (2521 L ha⁻¹), and Urja (3214 L ha⁻¹); It was observed that the best genotype was Keller, due to its stability, bioethanol production, and precocity.

KEY WORDS: Biomass; renewable energy; varieties *Sorghum bicolor*.

Introducción

En México el cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es muy importante por su volumen de producción (4.6 millones de toneladas) y superficie sembrada (1.4 millones de hectáreas); después del maíz y frijol (medias de los últimos cinco años). El estado de Tamaulipas ubicado en el noreste de México es el principal productor de sorgo, donde se produce el 43.0 % del total nacional (SIAP, 2022). Casi el total de la producción (95.0 %) se utiliza para la alimentación animal (Reyes-Rodríguez *et al.*, 2017; SAGARPA, 2017).

El problema del cambio climático producido sobre todo por el uso indiscriminado de los combustibles fósiles, y su constante aumento de precio; hacen de los combustibles renovables aceptables y económicamente viables (Khawaja *et al.*, 2014). La biomasa vegetal es una fuente de energía renovable, que se puede utilizar como complemento de los combustibles fósiles (Ratnavathi *et al.*, 2010, Pabendon *et al.*, 2017). El sorgo dulce está recibiendo mucha atención debido a que el jugo del tallo puede fermentarse directamente para producir bioetanol (Guden *et al.*, 2020), además de acumular gran cantidad de azúcares fermentables en el tallo y ser casi tan rico en azúcar, como la caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. (Silva *et al.*, 2021); se adapta

a diferentes sistemas de producción (López-Sandín *et al.*, 2021), se puede cultivar con insumos reducidos, responde favorablemente al estrés hídrico y tiene excelente potencial de producción de biomasa (Ekefre *et al.*, 2017; Yücel *et al.*, 2022). Su demanda para producción de bioetanol está aumentando rápidamente debido a su utilización en la mezcla de combustibles para automóviles (Prasad *et al.*, 2007), la producción de energía a partir de bioetanol de sorgo es útil para aminorar los efectos del cambio climático y el deterioro del ambiente (Williams-Alanís *et al.*, 2017).

Actualmente, los efectos del cambio climático, obligan a los fitomejoradores a desarrollar genotipos adaptados a mega-ambientes, lo cual garantiza la mejor producción del cultivo (Maldonado-Moreno *et al.*, 2021). La evaluación de cultivares y la identificación de mega-ambientes, se encuentran entre los objetivos más importantes de los ensayos multiambientales (MET), aunque su rendimiento es resultado de la combinación de los efectos del genotipo (G), el ambiente (E) y la interacción genotipo x ambiente (GE), sólo G y GE son relevantes para la evaluación de cultivares y la identificación de mega-ambientes (Yan *et al.*, 2000).

La interacción genotipo x ambiente es el factor que más interfiere en la identificación de genotipos específicos para ambientes específicos (Snedecor & Cochran, 1980). Esto complica la recomendación de cultivares para diferentes ambientes, por lo que hace necesario realizar análisis de estabilidad (Silva *et al.*, 2021). La identificación de variedades de sorgo que sean mejores en productividad y estabilidad que los cultivares existentes, ha sido una de las principales áreas temáticas de investigación (Worede *et al.*, 2020). En México se requiere desarrollar los programas de mejoramiento genético de sorgo, para la generación de nuevas variedades con mayor contenido de azúcares fermentables y rendimiento de bioetanol, que faciliten la transición del país hacia un sistema energético sustentable (Moreno-Hernández *et al.*, 2018). El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Río Bravo, Tamaulipas, México; comenzó a trabajar en el mejoramiento genético de sorgo para grano en 1973, México (Williams-Alanís *et al.*, 2021; 2022). A principios de los años 2000 se empezó a trabajar con sorgos dulces, liberando en el año 2010 la variedad RB-Cañero; el cual fue el primer material genético de sorgo dulce, para producir biomasa y azúcares con fines de obtención de bioetanol en México, posteriormente se continuó con la liberación de los sorgos dulces: RB-Pirulí, RB Tehua y RB Cañaveral (Montes-García *et al.*, 2021). Por lo antes mencionado el objetivo del presente trabajo fue evaluar las características agronómicas y la estabilidad en la producción de bioetanol; de siete genotipos comerciales y experimentales de sorgos dulce, en nueve ambientes del noreste de México.

Material y Métodos

La investigación se realizó durante los años 2013 a 2017 en nueve ambientes del noreste de México: cuatro en Marín, Nuevo León (M); M OI 2013-2014, M V-2014, M V-2015 y M V-2017 y cinco en Estación Cuauhtémoc (EC), Tamaulipas; EC V-2013, EC O-I-2013-2014, EC V-2014, EC V-2016 y EC O-I-2016-2017; (OI = ciclo otoño-invierno; V = verano). Se evaluaron siete genotipos de sorgos dulces: Keller y Urja; variedades comerciales que fueron introducidas respectivamente de Estados Unidos y la India; tres variedades, dos experimentales y una comercial, generadas

por el programa de mejoramiento genético de sorgo dulce del INIFAP, Campo Experimental Río Bravo; una variedad y un híbrido comercial originados en la Universidad Autónoma de Nuevo León (Tabla 1). Los experimentos se desarrollaron en ensayos uniformes, donde se utilizó el diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Tabla 1. Genotipos utilizados en el estudio de caracterización y estabilidad de sorgos dulces.

N	Nombre comercial y/o genealogía	GN	Origen
1	Dulcina	VC	Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL)
2	(SBB-25 x Keller) 17-1-2-1	VE	Campo Experimental Río Bravo (INIFAP)
3	(SBB-25 x Keller) 31-2-1-2	VE.	Campo Experimental Río Bravo (INIFAP)
4	Keller	VC	Estados Unidos
5	Urja	VC	India
6	RB-Cañero	VC	Campo Experimental Río Bravo (INIFAP)
7	Potrillo	HC	Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL)

N = Número de genotipo; GN = Tipo de genotipo; VC = Variedad comercial; VE = Variedad experimental; HC= Híbrido comercial; SBB-25 = Línea mantenedora de la fertilidad progenitora del híbrido de sorgo para grano RB-4000 del INIFAP.

El Campus Marín, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL); municipio de Marín, Nuevo León, se encuentra localizado en las coordenadas 25° 53' de latitud norte y 100° 02' de longitud oeste, con altitud de 355 m, el clima corresponde a BS1 (hwe), descrito como clima seco estepario cálido con lluvias en verano, con precipitación promedio anual de 595 mm y temperatura media anual de 22 °C (García, 2004). El tipo de suelo es vertisol delgado, con alto contenido de arcilla y carbonato de calcio, con bajos contenidos de materia orgánica y pH entre 7.5 a 8.5. En Marín los experimentos se condujeron en condiciones de riego, antes de la siembra se aplicó al voleo al suelo 2.0 t ha⁻¹ de gallinaza.

El ambiente Estación Cuauhtémoc, municipio de Altamira, Tamaulipas, Campo Experimental las Huastecas del INIFAP, se ubica en las coordenadas 22° 33' LN/ 98° 09' LO, con altitud de 20 m, presenta clima (Aw0) cálido subhúmedo con lluvias en verano y lluvia invernal de 5-10 % (García, 2004); con temperatura promedio anual de 24.5 °C y 842 mm de precipitación. El tipo de suelo es vertisol pélico arcilloso y profundo, con pH de 7.5 a 7.8. En Estación Cuauhtémoc los experimentos se condujeron en condiciones de temporal y la siembra se realizó en tierra húmeda, aplicando la semilla a chorrillo a mano en el fondo del surco. Tanto en Estación Cuauhtémoc como en Marín; el cultivo se manejó de acuerdo con las recomendaciones descritas para el cultivo de sorgo dulce para Tamaulipas (Montes-García *et al.*, 2013).

Toma de datos

Se tomaron los datos de días a floración (DF, cuando el 50 % de las plantas estaban en floración) y altura de planta (PH en cm, desde el suelo hasta el ápice de la panoja). Cuando las plantas alcanzaron la etapa de grano lechoso y masoso (Prasad *et al.*, 2007), que es la etapa cuando las plantas alcanzan el máximo contenido de azúcar en el jugo del tallo, se cosechó un metro lineal de la parcela útil, tomando las plantas en competencia completa, cortando la base del tallo de 3 a 4 cm del suelo, con las que se tomaron los siguientes datos: peso fresco total de planta (FPW), después de eliminar hojas y panícula de las plantas se obtuvo el peso fresco del tallo (SW), los °Brix, se obtuvieron con un refractómetro manual marca Atago. El peso seco del tallo (DSW), se obtuvo al secar el peso fresco del tallo, en una estufa a 65 °C durante tres días. El peso resultante de la muestra fue el DSW. Los valores en g se transformaron a kg ha⁻¹, los valores de peso de jugo kg ha⁻¹ y la producción teórica de bioetanol L ha⁻¹, se estimaron de acuerdo con las fórmulas descritas por Rakhmetova *et al.*(2020).

Producción de jugo/kg ha⁻¹ = (peso tallo fresco/kg ha⁻¹ - peso tallo seco/kg ha⁻¹) x 0.866.

Producción teórica de bioetanol/L ha⁻¹ = (Brix azúcar/100) x (0.65 L bioetanol/1 kg azúcar) x (0.85) x (peso tallo/kg ha⁻¹)

Esta misma fórmula para calcular la producción de bioetanol en los experimentos fue utilizada por (Williams-Alanís *et al.*, 2023), para estimar la aptitud combinatoria en genotipos de sorgo dulce. El efecto del ambiente y de los genotipos en el rendimiento y las características agronómicas se cuantificó mediante un análisis de varianza combinado con los datos de nueve experimentos (ambientes) y siete genotipos. Las comparaciones de medias para las características agronómicas se realizaron por medio de la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La interpretación de la interacción IGA se realizó mediante el análisis de dispersión gráfica basado en el análisis de componentes principales (PCA) con el modelo GGE biplot (Yan *et al.*, 2000). El análisis de varianza se realizó con el sistema SAS (SAS, 2006), mientras que para el modelo GGE biplot y la prueba de (Gollob, 1968) se utilizó el programa GEA-R (Pacheco *et al.*, 2015).

Resultados y Discusión

En el Tabla2 se muestran los resultados de las medias de las características agronómicas de los sorgos dulces sembrados en nueve ambientes del noreste de México; donde para la producción de bioetanol (BP); las variedades Urja (5), (SBB-25 x Keller) 17-1-2-1 (2), Keller (4), Dulcina (1), Potrillo (7) y (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (3) fueron iguales en cuanto a producción de bioetanol con un intervalo de (2521 a 3214 L ha⁻¹) y superiores a RB-Cañero (6) (1237 L ha⁻¹). Los resultados coinciden con las tendencias para las mismas variedades reportados por (Williams-Alanís *et al.*, (2017), en los promedios de experimentos, sembrados en el sur de Tamaulipas; donde RB-Cañero presentó la menor producción de bioetanol. En Turquía en un trabajo donde se evaluaron 53 genotipos dulces seleccionados de 551 accesiones y nueve cultivares; en

dos ambientes contrastantes durante dos años, encontraron que los genotipos originarios de Estados Unidos fueron los que presentaron los valores más altos para producción de bioetanol y características agronómicas asociadas (Guden *et al.*, 2020). Esto coincide con los resultados mostrados en este estudio para Keller, variedad originaria de EE. UU., la cual presentó excelentes resultados para producción de bioetanol (2935 L ha⁻¹). Yucel *et al.* (2022) estudiaron 21 variedades de sorgos dulces durante los años 2016 y 2017 en Turquía, encontraron una producción teórica de bioetanol, que oscila entre los rangos de 2020 y 5302 L/ha⁻¹. Los resultados de este trabajo coinciden con los obtenidos en este estudio en producción (2521 a 3214 L ha⁻¹); excepto por la variedad RB-Cañero la cual presentó menor producción (1237 L ha⁻¹) de bioetanol.

Tabla 2. Características agronómicas de sorgos dulces sembrados en nueve ambientes del noreste de México.

V	GENEALOGÍA	BP L ha ⁻¹	DF	PH (cm)	° Brix	FPW kg ha ⁻¹	SW kg ha ⁻¹	JW kg ha ⁻¹
5	Urja	3214 ^a	86 ^a	251 ^a	17.25 ^a	41881 ^{ab}	32914 ^{ab}	17422 ^{ab}
2	Exp 17-1-2-1	3139 ^{ab}	80 ^{bc}	243 ^{ab}	16.53 ^a	43629 ^{ab}	34100 ^{ab}	17773 ^{ab}
4	Keller	2935 ^{ab}	77 ^c	235 ^{bc}	16.97 ^a	40412 ^{abc}	31083 ^{ab}	16280 ^b
1	Dulcina	2842 ^{ab}	80 ^b	231 ^c	16.26 ^a	41382 ^{ab}	32099 ^{ab}	17927 ^{ab}
7	Potrillo	2725 ^{ab}	74 ^c	229 ^c	14.66 ^b	47030 ^a	34921 ^a	20410 ^a
3	Exp 31-2-1-2	2521 ^{ab}	86 ^a	235 ^{bc}	16.50 ^a	36681 ^{bc}	28386 ^{bc}	15358 ^b
6	RB-Cañero	1237 ^c	79 ^{bc}	217 ^c	9.81 ^c	33055 ^c	23532 ^c	14237 ^c
	Md	2669	80.26	235	15.43	40606	31005	17052
	CV	28.11	4.56	5.66	11.93	23.06	23.93	28.27

V = Numero de variedad; BP = Producción de bioetanol l/ha⁻¹; DF = Días a floración; PH = Altura de planta; ° Brix = Contenido de azúcar; FPW = Peso fresco total de plantas; SW = Peso fresco de tallos; JW = Peso de jugo; Md = Media; CV = Coeficiente de variación.

Para días a floración se encontraron diferencias significativas entre las variedades, resultando Urja y (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 más tardías, respecto a las demás. Las variedades más precoces fueron Potrillo, Keller y RB.Cañero. La precocidad es una característica agronómica importante, ya que la producción se obtiene en menor tiempo. Esto puede ser útil para reducir el intervalo de tiempo entre un cultivo y el siguiente (Williams-Alanís *et al.*, 2017). Zhang y Wang (2015), encontraron en sorgo dulce que los genotipos tardíos generalmente presentan mayor producción de biomasa. Williams-Alanís *et al.* (2017) no encontraron ventajas de los sorgos

tardíos para la producción de bioetanol. Por otra parte, se indica que cuando la estación de crecimiento es corta, los sorgos de ciclo precoz presentan ventajas en condiciones de sequía y altas temperaturas (Murphy *et al.*, 2014).

La altura de planta es un importante componente agronómico que incide en la producción de biomasa, su desarrollo depende de las condiciones de: clima, suelo, manejo del cultivo, genotipo, etc. (Williams-Alanís *et al.*, 2017). Los sorgos dulces, frecuentemente presentan alturas de planta superiores a 300 cm (Sylvester *et al.*, 2015). En estos experimentos no se encontraron genotipos de esta altura de planta, posiblemente debido a que las condiciones agrologicas de suelo y clima en los ambientes no fueron las óptimas; suelos delgados y pobres en Marín (García, 2004) y condición de secano en Estación Cuauhtémoc. Se ha encontrado una relación positiva entre altura de planta y producción de bioetanol (Williams-Alanís *et al.*, 2017; Sylvester *et al.*, 2015). En este estudio se encontraron diferencias significativas. Urja (5) con un valor de 251 cm, presentó una producción de bioetanol de 3214 L ha⁻¹ y Exp 17-1-2-1 (2) con 243 cm presento 3139 L ha⁻¹; fueron superiores (2) a RB-Cañero (6) con 1237 L ha⁻¹ y el cual obtuvo un valor significativamente más bajo de PH (217 cm.).

Respecto a °Brix, se encontraron diferencias significativas en donde Urja (17.25), Exp 17-1-2-1 (16.53), Keller (16.97), Dulcina (16.26), Exp 31-2-1-2 (16.50); fueron estadísticamente mejores que Potrillo (14.66) y RB-Cañero (9.81). La selección de genotipos para buena producción de jugo, °Brix y total de azúcares solubles es fundamental (Elangovan *et al.*, 2014), los sorgos dulces presentan valores de azúcar en el jugo entre 12.40 a 24 °Brix (Elangovan *et al.*, 2014) y 12.55 a 20.00 °Brix (Yucel *et al.*, 2022). En este trabajo los genotipos estudiados se encontraron dentro de esta clasificación; excepto RB-Cañero el cual presentó un valor de 9.81 °Brix, 2.67° menos que el promedio mínimo indispensable indicado por estos investigadores. Considerando que los sorgos dulces se caracterizan por que son de plantas altas (2.00 m o más), de alta producción de biomasa, tallos, jugo y azúcar; por el bajo valor de °Brix que presentó RB-Cañero, se deduce que no entra dentro de esta clasificación.

Los mejores sorgos dulces para producción de bioetanol son los de plantas altas (Williams-Alanís *et al.*, 2017; Rono *et al.*, 2016; Murray, 2008); con alta producción de biomasa. (Pothisoong & Jaisil, 2011; Elangovan *et al.*, 2014; Mishra *et al.*, 2015); con valores altos de peso de jugo y °Brix (Murray, 2008); mayor peso de tallo (Rono *et al.*, 2016); mayor volumen y peso de jugo del tallo (Murray, 2008). Estas características son de suma importancia, y son determinantes en los sorgos dulces para la producción de bioetanol.

Ambientes

Los resultados obtenidos por ambiente se muestran en el Tabla3, donde se observa que los ambientes evaluados en Estación Cuauhtémoc (EC), en general presentaron mayor producción de bioetanol y fueron los ambientes con valores más altos (ECV-2014 y ECOI-2016-2017). Los ambientes en Marín (M), presentaron los valores más bajos (MOI-2013-2014 y MV-2017). Mientras que, en Estación Cuauhtémoc, el suelo es profundo, con pH de 7.5 a 7.8. El ambiente juega un papel importante en la producción de azúcar. Esto coincide con lo reportado

por otros investigadores (Rooney & Serna, 2000; Almodares *et al.*, 2007; Alhajturki *et al.*, 2012). El ambiente que presentó el mayor valor para producción de bioetanol ECV-2014 (3845 L ha⁻¹), obtuvo los valores más altos para PH, FPW y SW.

Tabla 3. Resultados de las características agronómicas por ambiente, de los experimentos de sorgos dulces establecidos en nueve localidades de noreste de México.

No loc.	AM	BP L ha ⁻¹	DF	PH cm	°Brix	FPW kg ha ⁻¹	SW kg ha ⁻¹
5	ECV-2014	3845 ^a	76 ^c	266 ^a	15.2 ^{bcd}	59782 ^a	45526 ^a
7	ECOI-2016 2017	3522 ^{ab}	80 ^b	252 ^b	18.0 ^a	45908 ^{bc}	34535 ^b
2	MV-2014	3110 ^{bc}	84 ^{ab}	235 ^{cd}	14.3 ^{de}	51041 ^{ab}	38343 ^{ab}
6	ECV-2016	2898 ^{bcd}	71 ^d	244 ^{bc}	14.9 ^{bcd}	46314 ^{bc}	34521 ^b
4	ECOI-2013-2014	2396 ^{cde}	71 ^d	229 ^{de}	13.1 ^e	38133 ^{cd}	31404 ^{bc}
9	MV-2015	2303 ^{dc}	84 ^{ab}	235 ^{cd}	16.1 ^c	34494 ^{de}	26024 ^{cd}
3	ECV-2013	2243 ^{dc}	87 ^a	198 ^f	16.0 ^{bcd}	32783 ^{de}	25248 ^{cd}
1	MOI-2013-2014	1931 ^c	87 ^a	216 ^e	14.7 ^{cde}	30127 ^{de}	23885 ^d
8	MV-2017	1769 ^c	84 ^{ab}	235 ^{cd}	16.5 ^{ab}	26874 ^e	19559 ^d
	Md	2669	80	235	15.4	40605	31605
	CV	28.11	4.57	5.66	11.93	23.06	23.93

No. loc = Numero de ambiente; AM = Ambiente; BP = Producción de bioetanol l ha⁻¹; DF = Días a floración; PH = Altura de planta; ° Brix = Contenido de azúcar; FPW = Peso fresco total de plantas; SW = Peso fresco de tallos; JW = Peso de jugo, Md = Media; CV = Coeficiente de variación; EC = Estación Cuauhtémoc; M = Marín; V = Ciclo de verano; O-I = Ciclo otoño invierno.

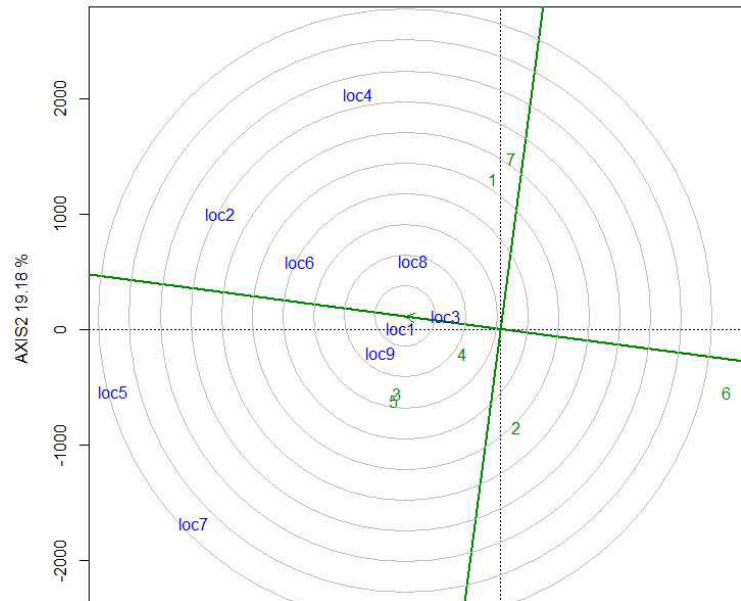


Figura 1. Plano de genotipo y genotipo x ambiente (GCE biplot) que indica la representatividad de nueve ambientes de evaluación de estabilidad de siete genotipos de sorgo dulce.

En la Figura 1 se observan los puntos de dispersión de ambientes y genotipos, además una flecha dibujada en un ambiente calculado cuyos puntos se obtienen con la media de los valores promedio de genotipos y de ambientes para ambos componentes principales, para posteriormente unir ambos puntos (genotipos y ambientes), con una recta que permite ubicar el ambiente teórico promedio, donde la dirección que indica la flecha es hacia donde se ubican los mejores genotipos (Yan & Kang, 2003), por lo que este eje permite definir el comportamiento de los genotipos; Al tomar como referencia el eje de las abscisas (X) del ambiente medio, podemos inferir que la mejor variedad fue Keller (4), seguida por (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (3) y Urja (5).

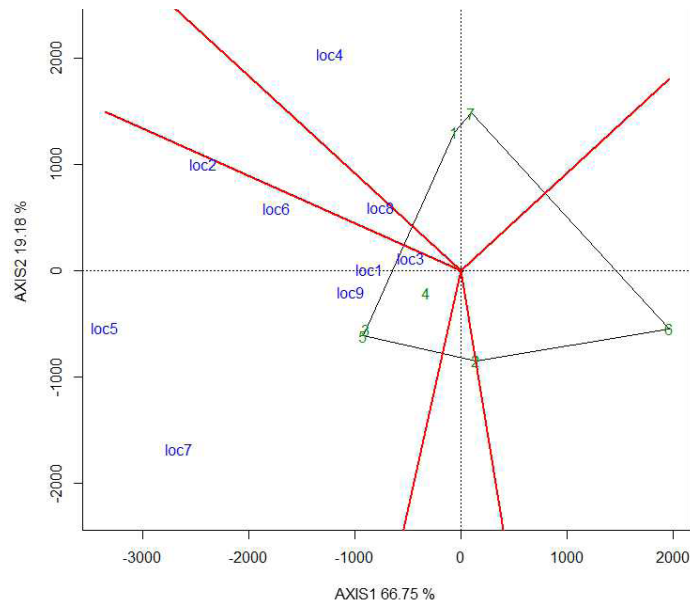


Figura 2. Estabilidad de siete genotipos de sorgo dulce evaluados en nueve ambientes, representados en el Plano de Genotipo y Genotipo x ambiente (CGE biplot), indicando el ordenamiento de variedades basados en el rendimiento medio y estabilidad obtenido para cada ambiente.

Para la interpretación de los genotipos, es el patrón de respuesta “Cual-Ganó-Dónde”, que permite identificar cual genotipo obtuvo el mayor rendimiento y en cual ambiente. Este concepto tiene como base el hecho de que los genotipos con los vectores con mayor rendimiento son los que se ubican a mayor distancia del origen del biplot, de tal forma que, al unir estos genotipos con línea recta, se forma un polígono (Figura 2) que identifica los genotipos más estables. Este polígono externo se complementa al trazar desde el origen del biplot, líneas perpendiculares que cortan a cada línea del polígono, de tal forma que el polígono queda dividido en cinco partes, cada una de estas con un vértice del polígono externo, en el cual se ubica un genotipo. Con estos datos el polígono externo muestra el patrón de comportamiento de los genotipos denominado “Cual-Ganó-Dónde”, los genotipos ganadores en cada ambiente. Para el caso del cuadrante III, se precisa que, entre los ambientes, loc 5, loc 7, loc 2, loc 6, loc 9, loc 1, loc 3 (Tabla3), en ellos el genotipo que mayor rendimiento presentó fue Urja (5) > (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (3) > Keller (4). Para el caso de (SBB-25 x Keller) 17-1-2-1 (2) y RB-Cañero (6), ubicados en cuadrantes donde no se ubicó ningún ambiente, se interpreta como genotipos que presentaron bajos rendimientos y no sobresalieron en ningún ambiente.

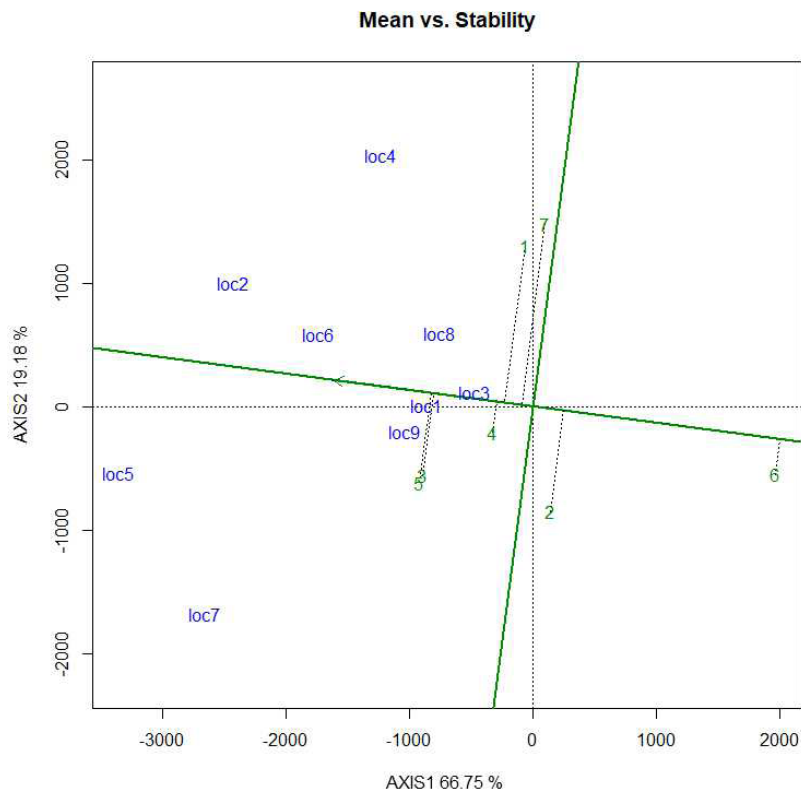


Figura 3. Ambientes de estabilidad y adaptabilidad de siete genotipos de sorgo dulce evaluados en nueve ambientes, representados en el Plano de Genotipo y Genotipo x Ambiente (CGE biplot).

El otro eje perpendicular (Figura 3), permite ubicar el grado de interacción entre cada genotipo y el ambiente medio, así la variedad más estable en este caso fue Keller (4), al tener la menor desviación o distancia con respecto al eje del ambiente medio. En este sentido las variedades Potrillo (7) y Dulcina (1), con la mayor distancia o desviación con respecto al citado eje, fueron las menos estables o predecibles. En las Figuras 1, 2 y 3, el modelo utilizado explica 85.93 % de la variabilidad total (PC1 = 66.75 % y PC2 = 19.18 %), lo que justifica la aplicación del método de parámetros de estabilidad para la evaluación de variedades a través de ambientes, ya que un valor aceptable es una proporción mayor a 75 % (Williams-Alanís *et al.*, 2021). Cabe resaltar, que cuando los genotipos se distribuyeron en los cuatro cuadrantes como en la Figura 3, es indicio de la diversidad genética que estos poseen, la cual es indispensable en un programa de mejoramiento genético exitoso (Maldonado *et al.*, 2021). Los resultados indican que la mejor variedad fue Keller; por su producción de bioetanol, estabilidad y mayor precocidad (77DF), y es la más apropiada para recomendar su siembra en el noreste de México.

Conclusiones

El modelo utilizado para estimar los parámetros de estabilidad, GGE biplot, explicó el 85.93 % de la variabilidad total. Las características agronómicas asociadas a la producción de bioetanol de los genotipos evaluados, fueron aceptables; excepto RB-Cañero que obtuvo el menor valor de °Brix (9.81) y la menor producción de bioetanol (1237 L ha⁻¹). Los genotipos más estables y con mayor rendimiento de bioetanol fueron: Keller (2935 L ha⁻¹); seguidas por (SBB-25 x Keller) 31-2-1-2 (2521 L ha⁻¹), y Urja (3214 L ha⁻¹); El mejor genotipo fue Keller, por su buena producción de bioetanol, estabilidad y precocidad.

Referencias

- Alhajturki, D., Aljamali, M., Kanbar, A., & Azmah, F. (2012). Potential of some sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes under two water regimes for sugar and bio-ethanol production. *Sugar Tech, An International Journal of Sugar Crops and Related Industries* 14, 376-382. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0181-x>
- Almodares, A., Hadi, M. R., & Dosti, B. (2007). Effects of salt stress on germination percentage and seedling growth in sweet sorghum cultivars. *Journal of Biological Science*, 7(8), 1492-1495. <https://doi:10.3923/jbs.2007.1492.1495>
- Ekefre, D. E., Mahpatra, A. K., Latimore, M. J., Belmer, D. D., Jena, U., Withehead, D. J., & Williams, A. L. (2017) Evaluation of three cultivars of sweet sorghum as feedstocks for ethanol production in the Southeast United States. *Heliyon*, 3(12), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00490>
- Elangovan, M., Kiran-Babu, P., Seetharama, N., & Patil, J. V. (2014). Genetic diversity and heritability characters associated in sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Sugar Tech, An International Journal of Sugar Crops and Related Industries*, 16(2), 200-210. <https://doi:10.1007/s12355-013-0262-5>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta edición. México. D. F. 91 p.
- Gollob, H. F. (1968). A statistical model, which combines features of factor analytic and analysis of variances technique. *Psychometrik*, 33(1), 73-115. <https://doi.org/10.1007/BF02289676>
- Guden, B., Erdurmus, C., Erdal, S. & Uzun, B. (2020). Evaluation of sweet sorghum genotypes for bioethanol yield and related traits. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, 15(2), 545-562. <https://doi.org/10.1002/bbb.2169>
- Khawaja, C., Janssen, R., Rutz, D., Luquet, D., Trouche, G., Oriol, P., Reddy, B., Srinivasa, R. P., Basavaraj, G., Schaffert, R. E., Damasceno, C. M. B., Parella, R., Zacharias, A., Bushmann, R., Rettenmaier, N., Reinhardt, G., Monti, A., Zegada, L. W., Amaducci, S., & Braconnier, S. (2014). Manual del sorgo dulce: Cultivo con potencial energético. München: WIP, 67 p. ISBN 978-3-936338-31-7. <https://agritrop.cirad.fr/574768/>
- Maldonado-Moreno, N., Alcalá-Rico, J. S. G. J., Ascencio-Luciano, G., & García-Rodríguez, J. C. (2021). Rendimiento y estabilidad de genotipos de soja para el trópico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), ME:1351-62. <https://doi.org/10.29312/remexca>

[v12i8.2267](#)

- Mishra, J. S., Thakur, Kewalanand, N. S., P., Sujathamma, P., Kushwaha, B. B., Rao, S. S., & Patil, J. V. (2015). Response of sweet sorghum genotypes for biomass, grain yield and ethanol production under different fertility levels in rainfed conditions. *Sugar Tech, An International Journal of Sugar Crops and Related Industries*, 17, 204-209. <http://doi:10.1007/s12355-014-0315-4>
- Montes-García, N., Vargas-Valero, E., Salinas-García, J. R., Espinoza-Ramírez, M., & Loredopérez, R. (2013). Tecnología de producción de sorgo dulce para la elaboración de bioetanol para Tamaulipas. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/957.pdf>
- Montes-García N., Pecina-Quintero, V., Williams-Alanís, H., Hernández-Martínez, M., Cisneros-López, Ma. E., & Moreno-Gallegos, T. (2021). Mejoramiento genético de sorgo en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(25), ME:59-62. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2824>
- Moreno-Hernández, J. M., Moreno-Gallegos, T., & López-Guzmán, J. A. (2018). Evaluation of theoretical ethanol production from forage sorghums (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Sinaloa, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 5(nesp2), e483. <https://doi.org/10.15741/revbio.05.nesp.e483>
- Murray, S.C. (2008). Genetic and phenotypic diversity in sorghum for improvement as a biofuel feedstock. (Tesis doctorado, Cornell University). <https://hdl.handle.net/1813/11052>
- Murphy, R. L., Morishige, D. T., Brady, J. A., Rooney, W. L., Yang, S., Klein, P. E., & Mullet, J. E. (2014). Ghd7 (Ma6) represses sorghum flowering in long days: Ghd7 alleles enhance biomass accumulation and grain production. *The Plant Genome*, 7(2), <https://doi:10.3835/plantgenome2013.11.0040>
- López-Sandin, I., Zavala-García, F., Levin, L. N., Ruiz, H. A., Hernández-Luna, C. E., & Gutiérrez-Soto, G. (2021). Evaluation of bioethanol production from sweet sorghum variety Roger under different tillage and fertilizer treatments. *BioEnergy Research*, 14(4), 1058-1069. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10215-7>
- Pabendon, M. B., Efendi, R., Santoso, S. B., & Prastowo, B. (2017). Varieties of sweet sorghum Super-1 and Super-2 and its equipment for bioethanol in Indonesia. In IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science*, 65(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/65/1/012054>
- Pacheco, A., Vargas, M., Alvarado, G., Rodríguez, F., Crossa, J., & Burgueño, J. (2015). "GEA-R (Genotype X Environment Analysis with R for Windows) versión 2.0", <https://hdl.handle.net/11529/10203>
- Pothisoong, T., & Jaisil, P. (2011). Yield potential, heterosis and ethanol production in F1 hybrids of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *KMITL Science and Technology Journal* 11(1), 17-21
- Prasad, S., Singh, A., Jain, N., & Joshi, H. C. (2007) Ethanol Production from Sweet Sorghum Syrup for Utilization as Automotive Fuel in India. *Energy Fuels*, 21(4), 2415-2420. <https://doi.org/10.1021/ef060328z>
- Rakhmetova, S. O., Vergun, O. M., Blume, R. Y., Bondarchuk, O. M., Shymamanska, O. V., Tsyganskov, S. P., Yemets, A. I., Blume, Y. V., & Rakhmetov, D. B. (2020). Ethanol production potential of sweet sorghum in north and central ukraine. *The Open Agriculture Journal*, 14(1), 321-338. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010321>

- Ratnavathi, C. V., Suresh, K., Kumar, B., Vijay-Pallavi, M., Komala, V., & Seetharama, N. (2010). Study on genotypic variation for ethanol production from sweet sorghum juice. *Biomass and Bioenergy*, 34(7), 947-952. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.002>
- Reyes-Rodríguez, E., Salem-Guevara, G., & Márquez Sánchez, R. (2017, abril 3). Productividad de la red bovino en Tamaulipas. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/opinion/Productividad-de-la-red-bovino-en-Tamaulipas-l-20170403-0007.html>
- Rono, J. K., Cheruiyot, E. K., Othira, J. O., Njuguna, V. W., Macharia, J. K., Owuochi, J., Oyier, M., & Kange, A.M. (2016). Adaptability and stability study of selected sweet sorghum genotypes for ethanol production under different environments using AMMI analysis and GGE biplots. *Scientific World Journal*. 2016; 2016:4060857. <https://doi.org/10.1155/2016/4060857>
- Rooney, W. L., & Serna, S. O. (2000). Sorghum Handbook of cereal science and technology. In: K. Kulp, & J. Ponte, editors, Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017, August 10). Sorgho grano mexicano. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030.
- SAS Institute.(2006). Statistical Analysis System Release 9.3 ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- SIAP [Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera]. (2022). 1 Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, R. A., Silva, M. J., Ribeiro, P. C. O., Parrella, N. N. L. D., Schaffert, R. E., & Parrella, R. A. C. (2021). Phenotypic stability and adaptability of sweet sorghum genotypes evaluated in different Brazilian regions. *Agronomy Science and Biotechnology*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.33158/ASB.r147.v8.2022>
- Snedecor, G. N., & W.G. Cochran (1980). Statistical methods. 7th ed. IOWA, State University Press. Ames, I. Edinburg, University, Reino Unido. Ed.507p
- Sylvester, E., A., Z. Li-Min, X., Yan, Z. Yu-Miao, L. Zhi-Quan, & Hai-Chun, J. (2015). Sweet sorghum ideotypes: genetic improvement of the biofuel syndrome. *Food and Energy Security*, 4(3), 159-177. doi.org/10.1002/fes3.63
- Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Zavala-García, F., Rodríguez-Vázquez, M. C., & Olivares-Sáenz, E. (2021). Potencial productivo de variedades experimentales de sorgo blanco para el sur de Tamaulipas. *Nova Scientia*. 13(26), 1-19. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2688>
- Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Zavala-García, F., Galicia-Juárez, M., Rodríguez-Vázquez, M. C., & Elizondo-Barrón, J. (2022). Line x tester analysis to estimate combining ability in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrícolas UNCUYO*, 54(2), 12-21. <https://doi.org/10.48162/rev.39.078>
- Williams-Alanís, H., Aranda-Lara, U., Arcos-Cavazos, G., Elizondo-Barrón, J., Galicia-Juárez, M., Hernández-Martínez, R., Zavala-García, F., & López-Guzmán, J. A. (2023). Line x tester analysis to estimate combining ability in sweet sorghum. *Revista Bio Ciencias*, 10, e1518. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1518>
- Williams-Alanís, H., Zavala-García, F., Arcos-Cavazos, G., Rodríguez-Vázquez, M. C., & Olivares-Sáenz, E. (2017). Características agronómicas asociadas a la producción de bioetanol en genotipos de sorgo dulce. *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 549-563.: <https://dx.doi.org/10.15517/ma.v28i3.26690>
- Worede, F., Mamo, M., Dereze, A. S., Solomon, D. S., Tsegaye, G. & Yemata Beze, Y. | (2020) Yield stability and adaptability of lowland sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in moisture-

- deficit areas of Northeast Ethiopia, *Cogent Food & Agriculture*, 6:1, 1736865, <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1736865>
- Yan W., A. Hunt., Q. Sheng, & Z. Szlavnic (2000). Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. *Crop Science*, 40(3), 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Yan, W., & Kang, M. S. (2003). GEE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists and agronomists. CRC press: <https://doi.org/10.1201/9781420040371>
- Yücel, C., Yücel, D., Hatipoğlu, R., & Dweikat, I. (2022). Research on the potential of some sweet sorghum genotypes as bioethanol source under Mediterranean conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 46(2), 141-151. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.2966>
- Zhang, B., & Wang, Q. (2015). MicroRNA-based biotechnology for plant improvement. *Journal of Cellular Physiology*, 230(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/jcp.24685>