

**CARACTERIZACIÓN DE LA DESCENDENCIA DE UN
POSIBLE HÍBRIDO CULTIVO-SILVESTRE ENTRE
SORGO (*Sorghum bicolor*) Y SORGO DE ALEPO (*S.
halepense*)**



JUAN MARÍA BIANCO ERRAMUSPE

Docente tutor: Dr. Pandolfo, Claudio

Docentes consejeros: Dr. Presotto, Alejandro

Dr. Martínez, Juan Manuel

Departamento de Agronomía

2023

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres, Raúl y María Ofelia, por el apoyo de todos estos años. Fueron, son y serán un sostén para mí en mi vida y gran parte de esto se los debo a ellos. Agradecerle también a mi hermano, Mariano, por haber estado presente en los buenos y malos momentos. También agradecerle a Virginia por todo el apoyo a la distancia desde el primer día, sus mensajes antes de rendir y por cada palabra de aliento cuando las cosas no salían bien.

A mi novia, Ana, quien me apoyo desde el comienzo y me contuvo en cada situación adversa y me incentivo a no bajar los brazos nunca.

A mis amigos de la infancia, los cuales tuve la suerte de mantener por muchos años, por todos los momentos vividos y por cada charla que hemos tenido.

A mis amigos de la universidad, grandes responsables de esto, por cada juntada a estudiar, cada mate compartido, las salidas al campo y por muchas cosas más.

A Claudio, mi tutor, gracias por permitirme realizar el trabajo con él y por toda la ayuda brindada. Gracias también a mis consejeros, Alejandro y Juan Manuel tomarse el tiempo para realizar correcciones y aportes.

Una mención especial a mi tío, Antonio, quien estuvo pendiente durante toda la carrera y que sé que va a estar muy orgulloso por el logro.

Por último agradecer a todas las personas que de alguna manera u otra me acompañaron en este camino.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	7
Generalidades y origen	7
El sorgo en Argentina, principales usos	7
El sorgo de Alepo.....	9
Características morfológicas	9
Efectos del sorgo de Alepo en la agricultura Argentina.....	10
Flujo genético entre <i>S. halepense</i> y <i>S. bicolor</i> y sus efectos	11
HIPÓTESIS	13
OBJETIVO	13
MATERIALES Y METODOS	14
Sitio experimental y desarrollo del ensayo	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
<u>Caracterización de los antecesores de los biotipos</u>	19
<u>Caracterización de las familias descendientes del posible híbrido</u>	25
Días a floración.....	25
Caracteres de hoja	27
Caracteres del tallo	29
Altura de la planta.....	30
Análisis multivariado.....	32
CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área sembrada con sorgo en Argentina y rendimiento promedio 2000- 2021. Fuente: MAGyP.....	8
Figura 2. Descripción botánica de la planta de sorgo. Adaptado de Vanderlip, 1993.....	10
Figura 3. Estructura simplificada de una población de sorgo de Alepo (Bioinvasiones y bioeconomía).	11
Figura 4. Plantines utilizados en el presente ensayo.	14
Figura 5. Trasplante de plantines y siembra.	15
.....	17
Figura 6. Cultivo en estado vegetativo.	17
Figura 7. Diferentes tipos de semillas utilizadas.....	21
Figura 8. Análisis de componentes principales de las distintas características de las semillas..	23
Figura 9. Cantidad de días requeridos por cada biotipo hasta alcanzar floración.....	25
Figura 10. Aparición de las primeras panojas.	26
Figura 11. Cultivo en estado reproductivo con todas las panojas emergidas.	26
Figura 12. Comparación entre colores de nervadura. En la imagen de la izquierda se observa el color de nervadura blanco (BCO, RUZ, ALE) y en la de la derecha el color verde claro (TOR y TUP).....	28
Figura 13. Altura de la planta (cm) para cada biotipo analizado.	30
Figura 14. Diferencias de altura entre los biotipos, donde las plantas más altas se corresponden con TOR1.....	31
Figura 15. Análisis de Componentes Principales de las variables cuantitativas evaluadas en los biotipos de sorgo. MCV: macollos vegetativos; ALT: altura de planta; CNE: color de nervadura; LHO: largo de hoja; DAF: días a floración; NHO; número de hojas; ATA: ancho del tallo; AHO: ancho de hoja.....	32
Figura 16. Análisis de conglomerados de las variables cuantitativas evaluadas en los biotipos de sorgo.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variedades e híbridos comerciales de sorgo usados en el ensayo de caracterización.	15
Tabla 2. Acciones de sorgo silvestre usadas en el ensayo de caracterización.	16
Tabla 3. Disposición de las acciones de sorgo (tratamientos) en el ensayo de caracterización.	16
Tabla 4. Caracterización morfológica de las plantas que dieron origen a los biotipos utilizados en el presente trabajo	20
Tabla 5. Características de grano presentadas por los distintos biotipos.	21
Tabla 6. Peso de mil granos (gr) promedio, para cada una de las plantas que dieron origen a las familias utilizadas en el ensayo.	24
Tabla 7. Resultados del análisis estadístico para los diferentes caracteres de hoja presentados por los biotipos.....	28
Tabla 8. Análisis estadístico para ancho de tallo y número de macollos de los diferentes biotipos.....	29

RESUMEN

El sorgo es un cultivo histórico en el país y es considerado uno de los cinco cultivos más importantes del mundo. Sus usos son diversos, entre los que se pueden mencionar: consumo humano y animal, reserva forrajera y confección de silajes y aptitud para la producción de biocombustibles. Por su parte el sorgo de Alepo es considerado como una de las peores malezas en varios países debido a que afecta el desarrollo de los cultivos estivales. Esto es ocasionado por su gran capacidad competitiva, la cual le permite una rápida colonización inicial que lleva al aumento de los costos económicos y de control. Se considera “flujo génico” al movimiento de genes de una población hacia otra. En el caso del sorgo el flujo genético con sus parientes silvestres presenta problemas ecológicos y agronómicos. El objetivo del presente trabajo fue determinar los caracteres fenotípicos de la descendencia de un posible híbrido cultivo-silvestre entre sorgo (*Sorghum bicolor*) y sorgo de Alepo (*S. halepense*) con el fin de obtener información sobre el origen de los individuos. El ensayo se llevó a cabo en el campo experimental del Dpto. de Agronomía durante la temporada 2020/21. Se seleccionaron siete familias hermanas descendientes del posible híbrido y se los comparo con seis cultivares y con dos poblaciones silvestres. El diseño del ensayo fue en bloques completamente aleatorizados con tres replicas, donde cada biotipo estuvo presente una vez en cada bloque. Los parámetros medidos en el experimento fueron: días a floración, ancho y largo de hoja, color de nervadura, ancho de tallo, numero de hojas, macollos vegetativos y altura de la planta. Los descendientes de la planta fuera de tipo no presentaron similitudes con el sorgo de Alepo en la mayoría de los caracteres medidos, encontrándose similar en la altura de la planta, aunque este valor fue muy variable entre todos los genotipos. Las mayores similitudes se presentaron con el cultivar Tupí 63 M San Pedro, lo que podría indicar que la descendencia contiene genes de este biotipo. Para confirmar el origen de las plantas deberían realizar estudios adicionales, por ejemplo, genéticos o citometría de flujo.

INTRODUCCIÓN

Generalidades y origen

El sorgo (*Sorghum bicolor*) es una especie domesticada que actualmente cuenta con cultivares con resistencia a inhibidores de la enzima AHAS en Argentina. Es el quinto cereal en importancia a nivel mundial detrás del maíz, el trigo, el arroz y la cebada, aportando el 3% de la producción total de granos. El USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos) estimó para septiembre de 2022 que la producción mundial de sorgo 2022/2023 rondará las 60,3 millones de toneladas.

El origen del sorgo se localiza en África Central (Etiopía o Sudán), ya que en esta zona se encuentra la mayor diversidad varietal de la especie. Esta diversidad disminuye hacia el norte de África y Asia. Aunque evidencias indican que surgió de forma independiente tanto en África como en la India. Es precisamente en este último país de donde datan en el siglo I d.C. las primeras referencias escritas. No se sabe exactamente cuándo se introdujo la planta por primera vez en América, aunque se asume que las semillas de esta especie llegaron al Nuevo Continente en barcos que transportaban esclavos desde África.

El sorgo en Argentina, principales usos

El sorgo es un cultivo histórico en la Argentina. En el país su principal zona de producción es la región pampeana, aunque debido a su eficiencia en el uso del agua y su comportamiento en suelos con limitada fertilidad, se adapta a las regiones semiáridas, y que con un buen manejo y rotaciones adecuadas provee efectos positivos en el suelo y en los cultivos posteriores (Colazo, 2020).

A partir de 1960 comenzó una tendencia creciente en la producción nacional de sorgo debido a la introducción de híbridos. En el ciclo 1970/71 llegó a cubrir 3,1 millones de ha y alcanzar una producción de 8,1 millones de toneladas (SSMA, 2016). En la década del 80, se produjo una disminución en la producción debido al aumento de la rentabilidad de cultivos competidores como la soja y el maíz (Colazo, 2020). En la campaña 05/06 hubo una disminución en la superficie sembrada, llegando a las 550.000

ha, una disminución notable teniendo en cuenta las 900.000 ha de la campaña 97/98 (Zamora *et al* 2007).

En la actualidad la siembra del cultivo se encuentra distribuida en las provincias de la región centro, acumulando el 73% de la superficie total entre Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires (Bolsa de Comercio de Rosario, 2022). En la última campaña se obtuvo un gran desempeño productivo alcanzando las 3,5 millones de toneladas (Figura 1), lo que posiciona al país como el quinto productor mundial (MAGyP, 2019).

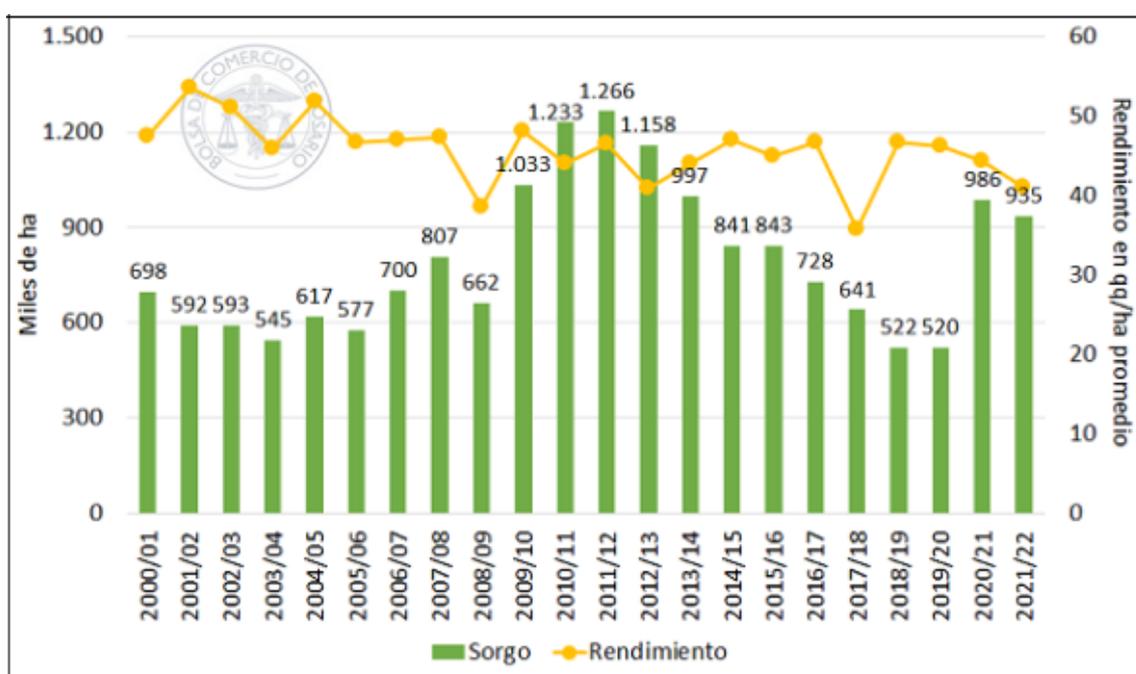


Figura 1. Área sembrada con sorgo en Argentina y rendimiento promedio 2000- 2021. Fuente: MAGyP.

Los usos del sorgo son múltiples y dependen de su genética. Además de su utilización para la alimentación animal, ya sea en seco o ensilado como grano húmedo, se lo puede utilizar para consumo humano. El grano de sorgo tiene la ventaja de carecer de prolaminas (proteína que forma el gluten), las cuales están presentes en otros cereales como trigo, avena, cebada y centeno. Esto hace que sea un alimento apto para el consumo de personas celiacas (INTA, 2011). Es un cereal que contiene una gran cantidad de vitaminas y minerales, entre los que se destacan las del grupo B y las del grupo E. A

su vez es rico en hierro, calcio, fósforo, zinc y fibra insoluble, lo que lo convierte en un importante alimento antioxidante (MAGyP, 2019). También se lo puede emplear como reserva forrajera o bien para la confección de silo de planta entera. Cabe destacar también su aptitud para la producción de biocombustibles, ya que el sorgo produce la misma cantidad de etanol por unidad de masa que otras materias primas comparables, pero utiliza un tercio de agua menos para formarla (INTA, 2011).

El sorgo de Alepo

El sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*) es una gramínea perenne de ciclo estival con un vigoroso sistema de rizomas, cosmopolita. Según Bhatti *et al.* (1960) esta especie, que ha sido el motivo de muchos estudios citológicos y genéticos, es muy probable que se haya originado como resultado de la duplicación del número de cromosomas ($2n = 40$) de una hibridación natural entre *Sorghum bicolor* x *Sorghum virgatum* en la región mediterránea del norte de África. Está considerada una de las peores malezas en 53 países, ubicados en un rango de latitudes muy amplio. Fue introducida al país como forrajera y dado su carácter de invasora se la declaró Plaga Nacional de la Agricultura en 1930. Existen una variedad de biotipos, de diferente origen y con atributos morfológicos y ecofisiológicos variables, incluyendo susceptibilidad a herbicidas.

Características morfológicas

El sorgo de Alepo presenta un vigoroso sistema radical, integrado por rizomas de crecimiento horizontal, los cuales son de suma importancia en la propagación de la especie. Un nuevo rizoma se desarrolla a partir de las yemas axilares y terminales de un rizoma primario. La corona es una parte del tallo que se encuentra debajo de la superficie del suelo, que da origen a nuevos macollos. Una planta aislada puede llegar a producir hasta 15 o más macollos, aunque este número se encuentra regulado por la densidad. Generalmente cada macollo remata en una panoja (Figura 2), existiendo una alta correlación entre el número de macollos y el número de inflorescencias (Leguizamón, 2006).

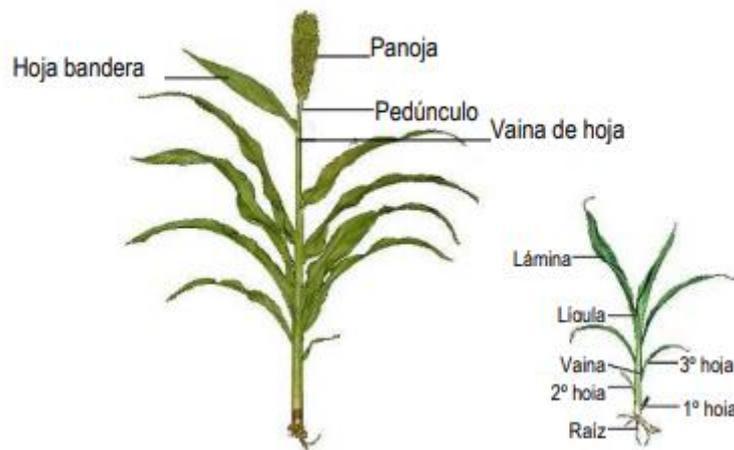


Figura 2. Descripción botánica de la planta de sorgo. Adaptado de Vanderlip, 1993.

La panoja es inicialmente compacta pero luego se extiende y se abre hasta tornarse laxa. Cada racimo contiene en su extremo espiguillas de a tres, un sésil que es fértil y dos pediceladas, estériles. Las hojas son lineales y anchas, y las vainas son de márgenes abiertos con lígula membranosa y no poseen aurículas (Leguizamón, 2006).

Efectos del sorgo de Alepo en la agricultura Argentina

Es una maleza que ha recibido una dedicación especial en las regiones templadas y ecoregiones subhúmedas con el objetivo de mantener a la planta por debajo de los niveles de umbral económico. En el país, afecta principalmente a cultivos estivales y su efecto trasciende al solo efecto competitivo, ya que la presencia de esta maleza influye en la planificación de las secuencias de cultivos y rotaciones, dados sus efectos en cultivos más sensibles a la competencia. (Leguizamón, 2006).

La biología de la especie demuestra una gran capacidad competitiva. Los índices de agresividad quedan demostrados en la vigorosa capacidad de producción de sus propágulos (Figura 3). La rápida colonización es garantizada en primera instancia por las semillas, las cuales pueden ser transportadas por animales, maquinaria agrícola o semillas contaminadas.

La estructura de la población es muy dinámica, ya que existen relaciones entre los componentes y, además, está afectada por el manejo del suelo, manejo agronómico, tecnologías utilizadas y los cultivos que se implantan (Pengue *et al.*, 2009).

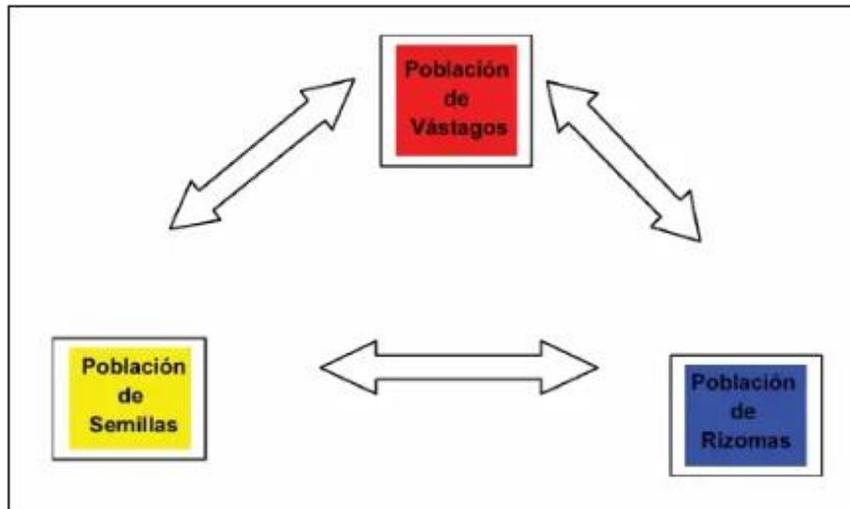


Figura 3. Estructura simplificada de una población de sorgo de Alepo (Bioinvasiones y bioeconomía).

Debido a lo antes mencionado y teniendo en cuenta que el paquete tecnológico de la labranza cero y los cultivos transgénicos llegaron al país a mediados de los 90, se reconocen como problemáticas: el aumento de los costos económicos, ya sea por el incremento en el uso de agroquímicos, maquinaria y gastos en el tratamiento de los granos; los costos ecológicos, como la competencia con el cultivo, avance y colonización sobre otros ambientes; los costos sociales, por un aumento de los costos de control, invasión de campos con la maleza y una mayor dependencia tecnológica (Pengue *et al.*, 2009).

Flujo genético entre *S. halepense* y *S. bicolor* y sus efectos

Existe la posibilidad de que los genes de una población se muevan hacia otra en un proceso conocido como “flujo génico” y es, de hecho, una de las bases de la evolución. El flujo génico puede ser medido y estimado por diferentes métodos como pueden ser la observación de caracteres fenotípicos o marcadores moleculares. En las plantas, el flujo de genes puede ocurrir por la dispersión de polen seguida de polinización cruzada e hibridación o por la dispersión de propágulos como semillas, fragmentos de plantas o la planta completa (Warwick *et al.*, 2009). La tasa de flujo genético puede variar según la especie (interespecífica), entre la población y los individuos pertenecientes a esa población (intraespecífica), o bien por la edad de la planta, la distancia y la densidad del polen disponible. El flujo genético supone un problema mayor cuando los rasgos

adaptativos, como la tolerancia al estrés biótico o abiótico se introducen en las malezas y les confieren una ventaja adaptativa.

El éxito de la hibridación natural entre diferentes especies de sorgo depende de varios factores, como puede ser la distancia entre las plantas donantes y receptoras de polen, la estructura de la flor, sincronía de la floración, sistema de apareamiento y las barreras genéticas (Ohadi *et al.*, 2017).

En el caso del sorgo (*S. bicolor*) el flujo genético con sus parientes silvestres presenta un problema ecológico y agronómico. Debido a que el sorgo de Alepo florece independientemente del fotoperíodo se produce muy frecuentemente una superposición entre el periodo de floración sin importar la fecha de siembra del cultivo y las condiciones ambientales.

El flujo de genes entre ambas especies puede reducir tanto la calidad como la cantidad en la producción de grano (Dillon *et al.*, 2007). Si ocurre por parte del cultivo a la maleza, los híbridos pueden portar rasgos nuevos y favorecer su persistencia en el medio ambiente. Contrariamente, si se da al revés, el mayor problema estaría dado por la entrada al banco de semillas, lo que facilitaría la persistencia de progenies híbridas en campos de producción (Ohadi *et al.*, 2017).

HIPÓTESIS

La descendencia de la accesión colectada en cercanías de Tornquist presentará segregación en distintos caracteres morfológicos, algunos asemejándose al sorgo cultivado y otros a la especie silvestre, que permitirán inferir su origen híbrido.

OBJETIVO

Determinar los caracteres fenotípicos de la descendencia de un posible híbrido cultivo-silvestre entre sorgo (*Sorghum bicolor*) y sorgo de Alepo (*S. halepense*), que permitan inferir sobre el origen de los individuos.

MATERIALES Y METODOS

Sitio experimental y desarrollo del ensayo

Durante el 2014 se encontró sobre el margen norte de la RN N° 33, en cercanías de la localidad de Tornquist, una población de sorgo de Alepo que presentaba plantas fuera de tipo. Una de estas plantas se destacaba del resto por su altura y vigor, por presentar una panoja más abierta, bien granada y con escasa dehiscencia. Se colectaron semillas de esa planta y su progenie fue criada en el campo experimental del Dpto. de Agronomía UNS, durante la temporada estival 2020/21.

De la descendencia sembrada durante el 2020, se seleccionaron siete individuos contrastantes en caracteres morfológicos medidos en el campo. La semilla de estas plantas fue conservada en condiciones de laboratorio hasta el 2021 (Figura 4), para ser utilizados en el ensayo descrito en esta tesis.



Figura 4. Plantines utilizados en el presente ensayo.

La siembra (Figura 5) se realizó el 27 de octubre del 2021 y se utilizaron como control seis cultivares y dos poblaciones silvestres. Dentro de los cultivados se utilizaron las siguientes variedades (Tabla 1). Como control, se utilizaron dos parientes silvestres del cultivo (Tabla 2).



Figura 5. Trasplante de plantines y siembra.

Tabla 1. Variedades e híbridos comerciales de sorgo usados en el ensayo de caracterización.

Genotipo	Identificación	Características
Advanta 2450 IG	ADV	Doble propósito, altos taninos, panoja semi-compacta. Ciclo largo 85 DAF, GM IV. 1,8 m braquítico.
Tupí 63 M San Pedro	TUP	Granífero, grano marrón, taninos medio, panoja semi-compacta. Ciclo corto 63-65 DAF, 110-112 DAC. 1,5 m exc 12 cm.
Blanco	BCO	Granífero, grano blanco, sin taninos (NN)
Colorado	COL	Granífero, grano colorado, sin taninos (NN).
Ruzrok	RUZ	Cultivar de la República Checa. Doble propósito, línea mejorada de un landrace. Altos taninos.
Forrajero	FOR	Tipo Sudán (NN).

Tabla 2. Accesiones de sorgo silvestre usadas en el ensayo de caracterización.

Variedad	Identificación	Nombre científico y origen
Sorgo de Alepo	ALE	<i>Sorghum halepense</i> , origen Saldungaray 2021.
Sorgo negro	NEG	<i>Sorghum alnum</i> , origen LABCEOL.

Del híbrido putativo entre sorgo cultivado y sorgo de Alepo (TOR) se utilizaron 7 individuos descendientes de la planta fuera de tipo que presentaban características diferentes entre sí, y se generaron familias hermanas (TOR1, TOR2, TOR5, TOR6, TOR13, TOR15 y TOR18).

El diseño del ensayo fue en bloques completamente aleatorizados con tres réplicas, con el objetivo de minimizar el efecto de la variabilidad. Cada variedad estuvo presente una sola vez en cada bloque (3) y se dispusieron al azar (Tabla 3).

Tabla 3. Disposición de las accesiones de sorgo (tratamientos) en el ensayo de caracterización.

Bloque 3	TOR1 ADV NEG	FOR ALE BCO	TUP COL TOR5	RUZ TOR18 TOR15	TOR6 TOR13 TOR2
Bloque 2	TOR2 TOR6 TOR5	TOR1 TOR18 NEG	COL TOR13 FOR	BCO ADV RUZ	TOR15 TUP ALE
Bloque 1	TOR1 TOR2 COL	TOR5 TOR15 FOR	ALE TOR18 TOR13	BCO NEG TOR6	ADV TUP RUZ

La emergencia del cultivo fue entre el 1 y el 2 de noviembre. Los últimos en emerger fueron el sorgo forrajero (sudán) y las dos especies silvestres (Alepo y negro). Se realizó una aplicación de 2,4-D el 20 de diciembre a razón de 1,2 L ha⁻¹ con el objetivo de eliminar malezas presentes asegurando un buen desarrollo del cultivo (Figura 6).



Figura 6. Cultivo en estado vegetativo.

A medida que el cultivo iba avanzando en su desarrollo se comenzó la toma de datos de diversos atributos de las plantas con el objetivo de compararlos y determinar qué características tenían en común. Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Días a floración: número de días transcurrido desde la siembra hasta que el 50% de las flores abiertas.

Ancho de hoja: distancia en cm entre los márgenes de la hoja bandera -2.

Largo de hoja: distancia en cm desde la base hasta el ápice de la hoja bandera -2.

Color de nervadura: se considera el color de la nervadura central, pudiendo ser: 1- Blanco; 2- Verde claro; 3- Amarillo; 4- Marrón; 5- Púrpura; 6- Otro

Ancho del tallo: grosor del tallo en cm medido en la parte central.

Numero de hojas: cantidad de hojas presentes en cada planta.

Macollos vegetativos: número de macollos por planta finalizado el periodo vegetativo.

Altura de la planta: distancia en cm desde la base de la planta hasta el final de la panoja.

Además, se consideraron medir caracteres reproductivos y de semilla, pero un fuerte ataque de pájaros durante el llenado de granos temprano no permitió realizarlo.

Para el análisis estadístico se utilizó el software Infostat (Di Rienzo, 2022) con el objetivo de comparar los diferentes caracteres morfológicos de cada variedad. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) y las fuentes de variación fueron los bloques y los biotipos. Las medias fueron comparadas mediante el test de Tukey. Medias con una letra común no son significativamente diferentes según Tukey ($p > 0,05$).

Para el análisis del color de nervadura no se utilizó el test Tukey, ya que los datos no eran paramétricos, por lo que se decidió utilizar la prueba de Kruskal Wallis.

También se realizó un análisis multivariado, con el objetivo de mostrar de una mejor manera la comparación que existía entre los posibles híbridos y el resto de los biotipos, teniendo en cuenta todas las variables cuantitativas mencionadas anteriormente. Con el mismo objetivo, y para poder agrupar biotipos de sorgo similares, se realizó un análisis de conglomerados para confeccionar un dendograma de agrupamiento basado en la distancia Euclídea para los caracteres cuantitativos de las accesiones de sorgo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los antecesores de los biotipos

A continuación, se presenta una tabla con los antecesores de los biotipos analizados en la que se describen los siguientes caracteres de interés: ancho de hoja, largo de hoja, número de hojas, días a floración, tipo de inflorescencia, excursión de la panoja, altura de la planta, cantidad de macollos, largo y ancho de la panoja, cobertura de grano, dehiscencia y color de grano. A partir de estas plantas se generaron familias de 30 individuos que fueron sembrados a campo y a partir de los cuales se realizaron todos los análisis de este trabajo (Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización morfológica de las plantas que dieron origen a los biotipos utilizados en el presente trabajo.

Biotipo	Ancho de hoja (cm)	Largo de hoja (cm)	Hojas (n)	Días a floración (n)	Tipo de infloresc.	Excursión (cm)	Altura de planta (cm)	Macollos (n)	Largo de panoja (cm)	Ancho de panoja (cm)	Cobertura de grano	Dehisc.	Color de grano
TOR1	7,5	77,0	9,0	122	8	15,5	208	2,0	24,1	7,2	3	0	4
TOR2	3,8	56,0	6,0	87	3	17,0	173	4,0	14,2	7,5	7	1	4
TOR5	4,3	66,0	5,0	87	4	16,5	171	2,0	33,0	8,4	5	1	4
TOR6	4,5	76,0	8,0	100	5	18,5	221	5,0	38,3	13,0	5	7	4
TOR13	4,0	65,1	7,5	100	4	26,1	185	2,0	30,3	10,5	3	7	4
TOR15	5,3	69,9	7,0	100	5	10,0	169	2,0	28,2	9,1	3	0	4
TOR18	5,0	71,6	8,0	-	5	11,8	165	2,0	35,9	22,6	5	1	1
FOR	4,5 ± 0,6	61,0 ± 6,3	5,9 ± 1,1	96 ± 6	5 ± 0	22,3 ± 5,6	208 ± 15	1,5 ± 0,7	26,0 ± 3,4	9,7 ± 2,7	6 ± 2	0 ± 0	4 ± 0

A su vez se realizó un ANOVA para algunos datos importantes de las semillas (perímetro, área y circularidad) que dieron origen a los biotipos de 2022 (Tabla 5) (Figura 7). Esta información se obtuvo mediante el software ImageJ.



Figura 7. Diferentes tipos de semillas utilizadas.

Tabla 5. Características de semilla presentadas por los distintos biotipos.

BIOTIPO	Área	Circularidad	Perímetro
ALE	0,05 a	0,77 b	0,87 a
NEG	0,06 b	0,70 a	1,04 bc
TOR1	0,11 gh	0,83 d	1,28 gh
TOR2	0,10 fg	0,79 bc	1,25 fg
TOR5	0,08 d	0,84 d	1,12 ce
TOR6	0,08 de	0,83 d	1,13 de
TOR13	0,07 cd	0,83 d	1,06 bd
TOR15	0,09 cd	0,85 df	1,10 bd
TOR18	0,07 bc	0,85 df	1,01 b
RUZ	0,10 ef	0,83 cd	1,20 ef
BCO	0,11 h	0,84 de	1,31 gh
ADV	0,12 hi	0,88 f	1,29 gh
TUP	0,13 ij	0,83 cd	1,40 i
COL	0,13 j	0,88 ef	1,37 hi

El primer parámetro analizado fue el área, el cual presentó diferencias entre los distintos biotipos de TOR. TOR18, TOR15 y TOR13 fueron los que tuvieron una menor área, mientras que TOR1 y TOR2 tuvieron un área mayor. A su vez TOR1 no presentó diferencias significativas con los genotipos cultivados BCO y ADV. El biotipo que presentó una menor área fue el sorgo de Alepo, con una marcada diferencia sobre los restantes.

En cuanto a la circularidad el único que difirió con el resto de los biotipos analizados fue TOR2, ya que tanto TOR1, TOR5, TOR6, TOR13, TOR15 y TOR18 no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$). TOR2 se encontró similar en el análisis con el sorgo de Alepo, mientras que el resto presentó similitudes con TUP, RUZ y BCO. Para TOR18 y TOR15 tampoco se encontraron diferencias con COL y ADV, siendo los biotipos que presentaron un mayor valor en esta variable.

La última variable analizada fue el perímetro del grano, donde se observaron diferencias entre los biotipos. TOR18 no presentó diferencias con TOR13 y TOR15. Estos últimos tampoco difirieron de TOR5 y TOR6. Para el caso de TOR2 y TOR1 no se encontraron diferencias entre ellos ($p > 0,05$) pero si difirieron marcadamente del resto de los híbridos, aunque no ocurrió lo mismo con ADV y BCO los cuales se encontraron similares en el análisis. Como ocurrió con el área, el sorgo de Alepo volvió a ser el biotipo que arrojó un valor marcadamente menor a los restantes.

Mediante un análisis multivariado de los datos anteriormente expuestos (Figura 8), se pudo observar la distribución de las distintas plantas segregantes del híbrido putativo, en comparación con distintos genotipos cultivados (FOR, ADV, COL, BCO, TUP y RUZ) y silvestres (ALE Y NEG). Con base en estos caracteres de semilla, los individuos segregantes TOR se agruparon junto con el cultivar forrajero tipo Sudán (FOR), y se separaron de algunos cultivares (ADV, COL y TUP) y de los silvestres (ALE y NEG). Sólo un individuo segregante (TOR1), se asemejó al híbrido granífero BCO. El cultivar forrajero de República Checa (RUZ) se agrupó junto con el cultivar forrajero argentino.

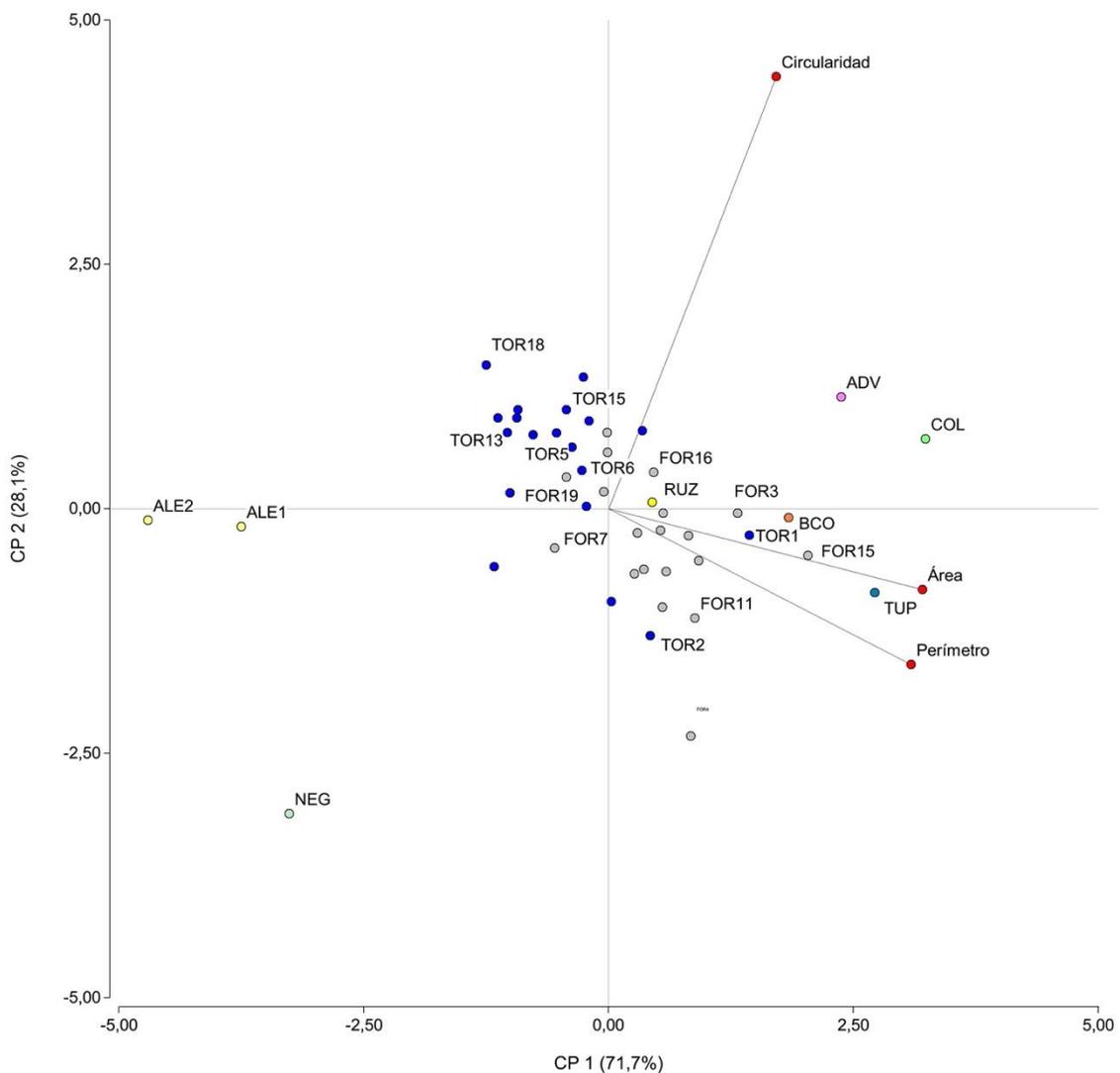


Figura 8. Análisis de componentes principales de las distintas características de las semillas.

Para el caso de los posibles híbridos también se realizó un análisis del P1000 de los granos.

Tabla 6. Peso de mil granos (g) promedio, para cada una de las plantas que dieron origen a las familias utilizadas en el ensayo.

BIOTIPO	P1000
TOR1	23,74 a
FOR	19,14 b
TOR2	14,76 c
TOR5	13,34 c
TOR6	15,31 c
TOR13	13,68 c
TOR15	14,52 c
TOR18	12,71 c

En este caso se observó que la mayor parte de los individuos del biotipo TOR no presentaron diferencias significativas entre sí. Sin embargo, todos se diferenciaron del híbrido forrajero FOR, que presentó un mayor valor de peso de 1000 granos. El único que presentó diferencias significativas con el resto fue TOR1, que a su vez tuvo mayor P1000 que el del híbrido forrajero.

Caracterización de las familias descendientes del posible híbrido

Días a floración

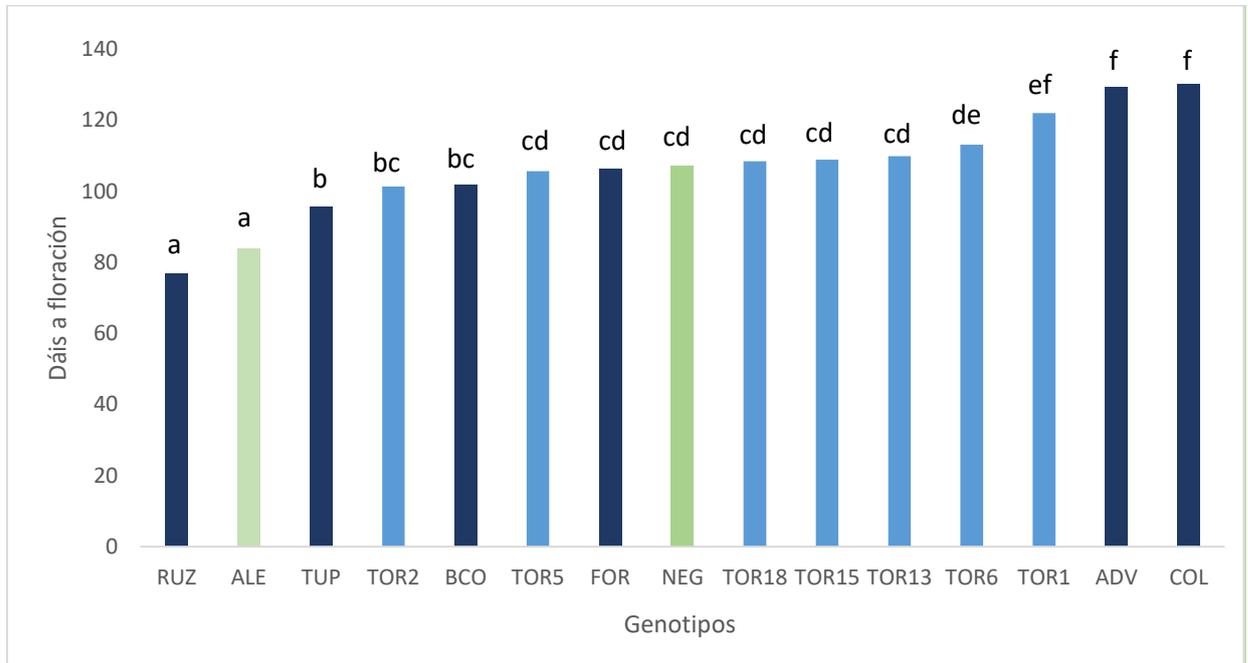


Figura 9. Cantidad de días requeridos por cada biotipo hasta alcanzar floración.

A partir del análisis se encontraron diferencias entre las familias hermanas (Figura 9). TOR2 difirió significativamente de TOR1 y TOR6, los cuales tardaron una mayor cantidad de días en llegar a floración. El resto de las familias no presentaron diferencias significativas entre sí. A su vez TOR2 se caracterizó por ser el biotipo que presentó un menor número de días hasta llegar a floración, de forma similar tanto a TUP (granífero) y BCO (granífero), como a FOR (forrajero) y NEG (silvestre). Por su parte para TOR5, TOR18, TOR15 y TOR13 no se encontraron diferencias significativas con BCO, NEG y FOR. Para el caso de TOR6 no se encontraron diferencias con el sorgo negro ni con el forrajero. El biotipo que tardó un mayor número de días en florecer fue TOR1, el cual no presentó diferencias significativas con ADV (doble propósito) y COL (granífero). (Figura 10 y 11).



Figura 10. Aparición de las primeras panojas.



Figura 11. Cultivo en estado reproductivo con todas las panojas emergidas.

Caracteres de hoja

En cuanto al ancho de hoja (Tabla 7), el genotipo que presentó diferencias entre los posibles híbridos fue TOR1, el cual tuvo un ancho de hoja mayor que el resto. Los biotipos TOR2, TOR18 y TOR5 fueron los únicos que no presentaron diferencias significativas con el genotipo RUZ, mientras que TOR6 presentó valores intermedios entre los genotipos cultivados y los silvestres.

Entre los genotipos TOR6, TOR1, TOR18 y TOR2 no se encontraron diferencias significativas para largo de hoja. A su vez, tampoco se encontraron diferencias entre TOR2 y TOR5. Entre los distintos orígenes maternos de la población de Tornquist, TOR6 fue el que presentó el largo de hoja menor, mientras que TOR5 tuvo el largo de hoja mayor teniendo en cuenta el total de los biotipos. RUZ, BCO y ALE presentaron menor largo de hoja que todos los biotipos TOR.

En cuanto al número de hojas, fue el carácter que presentó mayores discrepancias entre las familias hermanas, ya que se encontraron diferencias significativas entre TOR5, TOR2 y TOR1, al mismo tiempo que TOR18 y TOR6 no presentaron diferencias entre ellos pero sí con el resto. TOR5 fue la familia que presentó la media más baja para esta variable, contrastando con TOR1 que presentó la media más alta, la cual fue casi del doble que la anterior. Cuando se comparó con los otros biotipos, no hubo diferencias significativas entre RUZ y TOR5 ni entre BCO y TOR2. A su vez, TOR18 y TOR6 fueron similares a TUP. Por otro lado, TOR1 se diferenció significativamente del resto de los biotipos, arrojando la media más alta para esta variable.

Tabla 7. Resultados del análisis estadístico para los diferentes caracteres de hoja presentados por los biotipos.

Biotipo	Ancho de hoja	Largo de hoja	Número de hojas	Color de nervadura
ALE	2.36 a	56.27 a	5.79 a	1 a
TOR1	6.45 d	66.28 b	13.21 e	2 b
TOR2	4.98 bc	67.98 bc	9.21 c	2 b
TOR5	5.06 bc	74.8 c	7.67 b	2 b
TOR6	4.75 b	66.11 b	11.5 d	2 b
TOR18	5.05 bc	66.43 b	10.55 d	2 b
RUZ	5.6 c	50.83 a	7.46 b	1 a
BCO	7.56 e	56.04 a	8.96 c	1 a
TUP	7.67 e	69.28 bc	10.75 d	2 b

Para color de nervadura se encontró que todas las familias hermanas presentaron el mismo color, verde claro, similar al biotipo TUP. Para el caso de BCO, RUZ y ALE su color de nervadura fue blanco (Figura 12).



Figura 12. Comparación entre colores de nervadura. En la imagen de la izquierda se observa el color de nervadura blanco (BCO, RUZ, ALE) y en la de la derecha el color verde claro (TOR y TUP).

Caracteres del tallo

Con respecto al ancho de tallo, para el caso de las plantas fuera de tipo solo se encontraron diferencias significativas entre TOR1 y el resto. Además TOR1 se destacó por presentar la media más alta para esta variable entre todos los biotipos analizados. TOR5, TOR2, TOR6 y TOR18 no presentaron diferencias significativas con el genotipo cultivado BCO. A su vez, TOR5 tampoco se diferenció de RUZ. Tupí (granífero) no difirió significativamente de TOR 18, ni de TOR1. El sorgo de Alepo se caracterizó por ser el único que presentó diferencias significativas con todos los cultivares analizados, teniendo la media más baja en todo el análisis.

En el análisis de los macollos no se encontraron diferencias significativas entre las medias de ninguno de los posibles híbridos analizados. Los biotipos menos macolladores fueron los cultivados (BCO, RUZ, TUP), los cuales no presentaron diferencias significativas con TOR1, TOR18 y TOR2. Para el caso de TOR6 y TOR5 se determinó que sus medias eran similares solamente a RUZ y TUP.

Con relación al número de macollos por planta, el sorgo de Alepo fue el biotipo más macollador con una amplia diferencia con el resto, siendo casi el triple que el biotipo más cercano (TOR5).

Tabla 8. Análisis estadístico para ancho de tallo y número de macollos de los diferentes biotipos.

Biotipos	Ancho de tallo	Número de macollos
ALE	4.33 a	12.17 c
TOR1	15.36 e	2.58 ab
TOR2	11.73 c	3.17 ab
TOR5	11.38 bc	4.39 b
TOR6	12.01 c	3.92 b
TOR18	12.55 cd	3.03 ab
RUZ	9.52 b	2.42 ab
BCO	11.7 c	1.33 a
TUP	14.24 de	2.42 ab

Altura de la planta

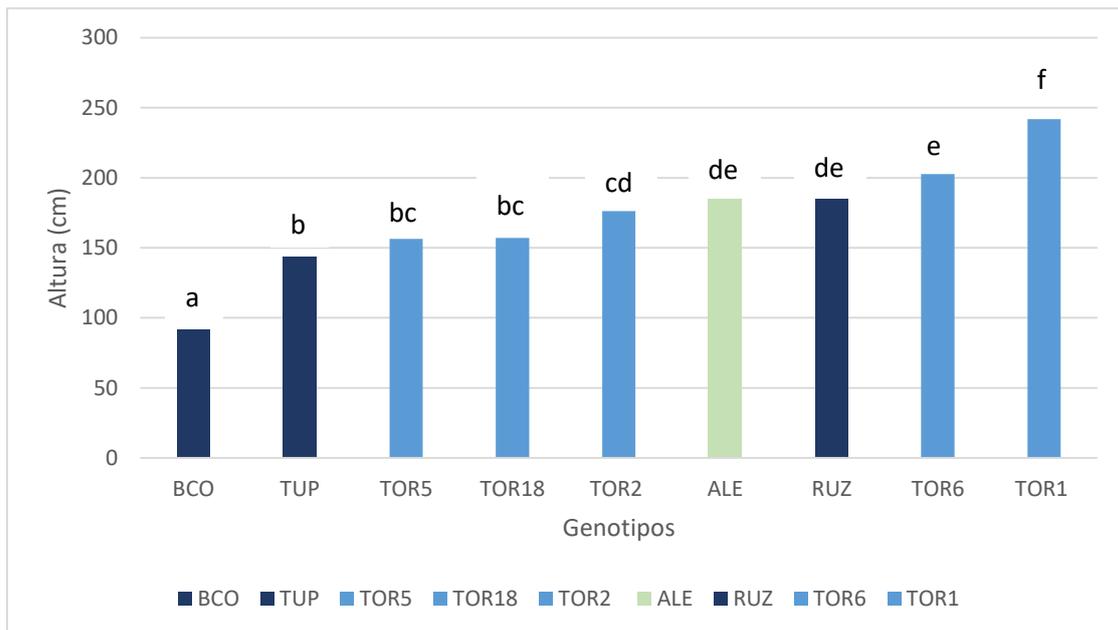


Figura 13. Altura de la planta (cm) para cada biotipo analizado.

Se pudo observar en el análisis (Figura 13) que no hubo diferencias significativas entre las medias de TOR5, TOR18 y TOR2. Para el caso de TOR6 y TOR1 sí se encontraron diferencias entre ellos, ya que este último fue el que más altura presentó con amplia diferencia con el resto de los biotipos (Figura 14).

En cuanto a la comparación con los diferentes cultivares el análisis arrojó que no se encontraron diferencias significativas entre TOR5 y TOR18 con TUP (granífero). TOR2 fue similar al sorgo de Alepo y a RUZ (doble propósito). TOR6 y TOR1 fueron los biotipos más altos de todos los analizados.



Figura 14. Diferencias de altura entre los biotipos, donde las plantas más altas se corresponden con TOR1.

Análisis multivariado

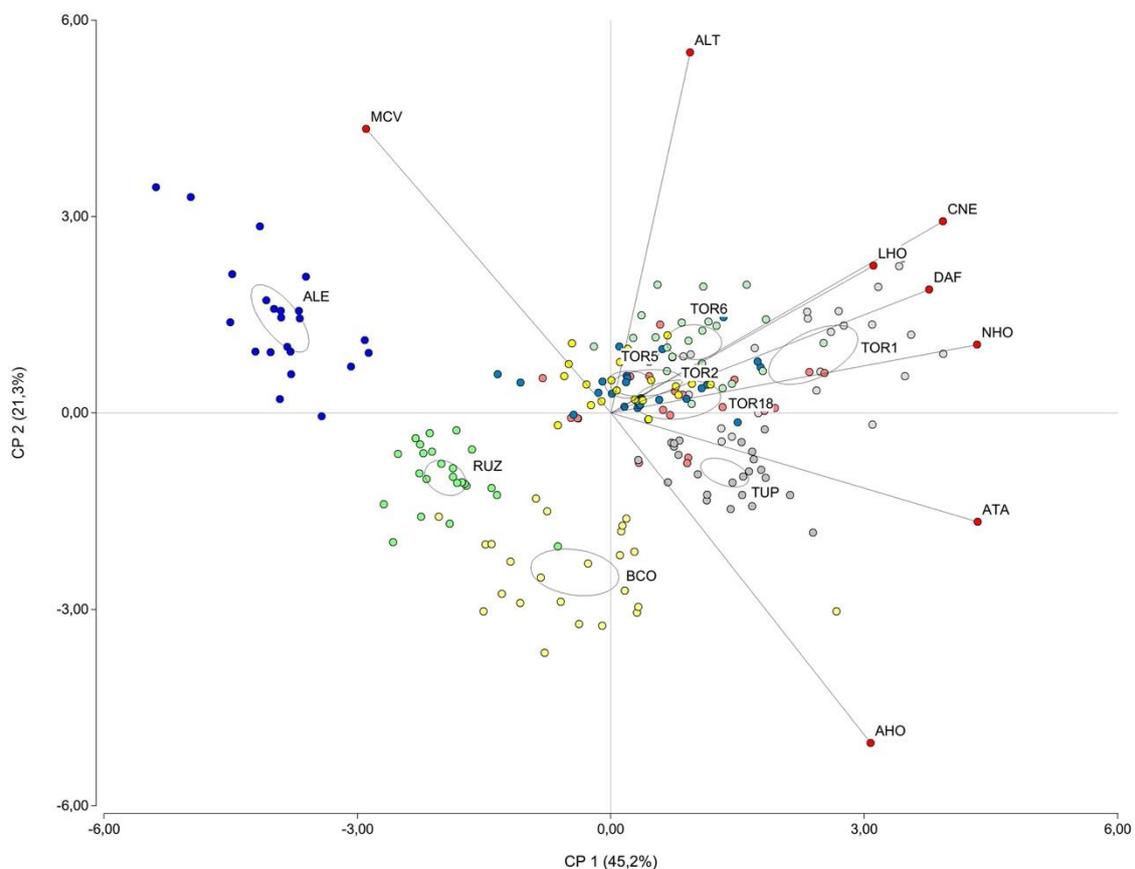


Figura 15. Análisis de Componentes Principales de las variables cuantitativas evaluadas en los biotipos de sorgo. MCV: macollos vegetativos; ALT: altura de planta; CNE: color de nervadura; LHO: largo de hoja; DAF: días a floración; NHO: número de hojas; ATA: ancho del tallo; AHO: ancho de hoja.

En el análisis se observó que las familias hermanas no resultaron similares al sorgo de Alepo (Figura 15), el cual difirió marcadamente de todas, tanto por su elevada producción de macollos vegetativos como por sus bajos valores de número de hojas y días a floración. Por lo tanto, se encontraron mayores similitudes con los genotipos cultivados, especialmente en TUP.

Las familias hermanas del híbrido putativo resultaron ser similares entre sí todas, menos TOR1 la cual difirió del resto por su color de nervadura, días a floración y número de hojas.

También se realizó un análisis de conglomerados (Figura 16), donde se observó de la misma forma una mayor cercanía entre las distintas familias hermanas TOR y el híbrido granífero TUP. La excepción fue TOR1 que se ubicó más alejada que el resto de sus hermanas. En un lado separado se ubicaron los otros genotipos cultivados RUZ y BCO, mientras que el sorgo de Alepo se separó completamente del resto.

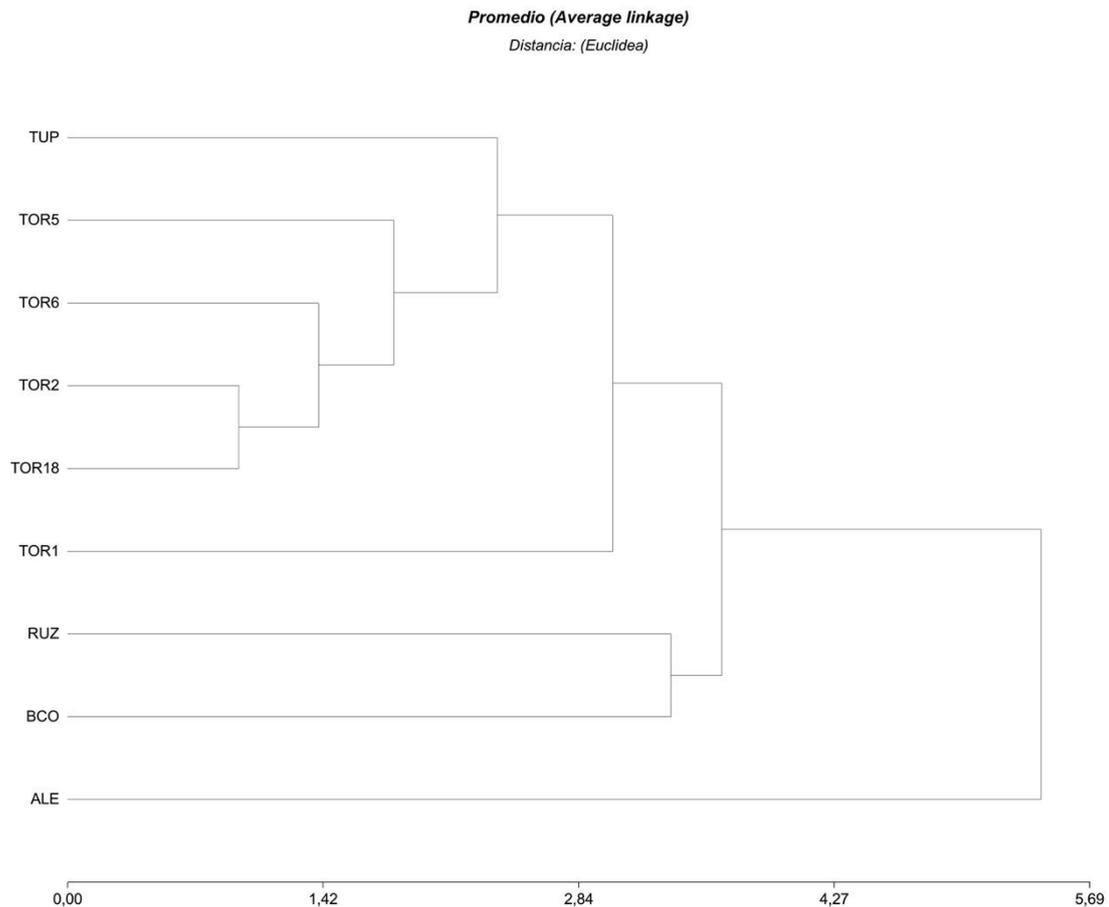


Figura 16. Análisis de conglomerados de las variables cuantitativas evaluadas en los biotipos de sorgo.

Los resultados mostraron que las familias descendientes del probable híbrido presentaron una gran variabilidad entre plantas. Esta variabilidad podría deberse a la dirección del flujo genético y concuerda con lo dicho por Ohadi *et al* (2017), quienes afirmaron que cuando el flujo de genes ocurre desde malezas/parientes silvestres a sorgos cultivados, los nuevos rasgos aún podrían transferirse a los híbridos, aunque la frecuencia del flujo de genes y las características de aptitud de los híbridos pueden diferir.

A pesar de esta variabilidad, se observó que las familias fueron similares en mayor medida a los biotipos cultivados. Esto pareciera diferir de lo expuesto por Sangduen y Hanna (1984), quienes afirmaban que en cruzamientos entre *S. bicolor* y *S. halepense*, los híbridos eran vigorosos, frondosos y más parecidos a *S. halepense* que *S. bicolor*.

La ausencia de rizomas también se contrapone con varios trabajos que mencionan la presencia de esta característica en los híbridos entre las dos especies, sin embargo, en algunos casos se ha observado segregación (Ohadi et al., 2017).

En cuanto a las características morfológicas las familias no presentaron similitudes con el sorgo de Alepo tanto en los caracteres de tallo (ancho de tallo y número de macollos) como en los de hoja (número de hojas, color de nervadura, ancho y largo de hoja). Esto presenta discrepancias con lo expuesto por Dweikat (2005) quien afirmó que los híbridos fueron intermedios entre las especies parentales en cuanto a características morfológicas.

Arriola y Ellstrand (1997) afirmaron que híbridos de *S. halepense* x *S. bicolor* no mostraron ningún aumento o disminución significativa en el tiempo de floración, producción de panículas, producción de semillas, viabilidad del polen, producción de macollos o biomasa. El presente trabajo difirió de lo evidenciado anteriormente ya que los días a floración fueron mayores en el caso de todas las familias hermanas, las cuales se mostraron muy similares entre sí. Por su parte la producción de macollos de las familias se mantuvo muy por debajo de lo mostrado por *S. halepense* lo cual hace pensar que no existe relación entre ambos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se podría plantear una nueva hipótesis en la cual el flujo genético en realidad no fue con sorgo de Alepo sino entre un cultivar granífero y uno forrajero. De todas formas, hay que considerar que, si el individuo original colectado en 2014 fue la F1 de una cruce entre Alepo y algún sorgo cultivado, y la descendencia criada en 2020, la F2 segregante; las familias caracterizadas en este ensayo serían una F3 en la cual las plantas más similares a sorgo de Alepo se habrían perdido por menor vigor o infertilidad.

CONCLUSIONES

Se puede afirmar que ninguno de los descendientes de la planta fuera de tipo presentó similitudes con el sorgo de Alepo para la mayoría de los parámetros evaluados, excepto en la altura de la planta, el cual evidencio una alta variabilidad entre todos los biotipos analizados.

El biotipo que presentó las mayores similitudes con las familias hermanas fue Tupí 63 M San Pedro, encontrándose similar en el largo de hoja, numero de hojas, color de nervadura, ancho de tallo y numero de macollos. Esto parece indicar que la descendencia analizada podría contener genes de este cultivar o de alguno similar.

Cabe destacar que una limitante del trabajo fue que sólo se contó con datos vegetativos ya que el ataque de pájaros impidió que se tomaran datos de las panojas. Haber contado con esta información hubiese permitido contar con información más completa.

Con el objetivo de tener más información y llegar a datos más exactos habría que realizar más estudios, ya sea genéticos o de citometría de flujo (cantidad de ADN) para poder confirmar con más precisión el origen de las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arriola, P. E., Ellstrand, N. C. 1997. Fitness of interspecific hybrids in the genus *Sorghum*: persistence of crop genes in wild populations.
- Bhatti, A.G.; Endrizzi J. E.; Reeves R.G.1960. Origin of Johnsongrass. Journal of Heredity 107-110.
- Bolsa de comercio de Rosario. 2021. Estado de situación del sorgo argentino 2021/22. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/print/pdf/node/93600>
- Carrasco, N.; Bolletta, A.; Melin, A.; Zamora, M.; Marinissen, J.; Gigón, R.; Forján, H.; Lagrange, S.; Campos, P.; Manso, L.; Cicchino, M. 2011. Manual de sorgo. Sorghum handbook.
- Colazo, Juan; Garay, Jorge. 2020. Cultivos de cobertura en San Luis.
- Dillon, S. L., Shapter, F. M., Henry, R. J., Cordeiro, G., Izquierdo, L., Lee, L. S. 2007. Domestication to crop improvement: genetic resources for *Sorghum* and *Saccharum* (Andropogoneae).
- Dweikat, I. 2005. A diploid, interspecific, fertile hybrid from cultivated sorghum, *Sorghum bicolor*, and the common Johnsongrass weed, *Sorghum halepense*.
- Leguizamón E. S. 2006. *Sorghum halepense*. L. Pers. (Sorgo de Alepo): base de conocimientos para su manejo en sistemas de producción.
- MAGyP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca). 2019. Perfil del sorgo. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/informes/perfil-de-sorgo-2019.pdf
- Pengue, Walter; Monterosso, Iliana; Binimelis, Rosa. 2009. Bioinvasiones y bioeconomía: el caso del sorgo de alepo en la agricultura argentina.
- Sangduen, N., Hanna, W. 1984. Chromosome and fertility studies on reciprocal crosses between two species of autotetraploid *Sorghum bicolor* (L.) Moench and *S. halepense* (L.).
- Sara Ohadi; George Hodnett; William Rooney; Muthukumar Bagavathiannan. 2017. Gene Flow and its Consequences in *Sorghum* spp., Critical Reviews in Plant Sciences.
- [Sorghum Halepense]. (s. f.). Disponible en: https://www.ecured.cu/Sorghum_halepense
- SSMA. (MAGyP Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca). 2016. Informe sobre sorgo. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/new/0-0/programas/dma/granos/Informe%20de%20Sorgo-SEPTIEMBRE%202016.pdf>
- Warwick, S. I., Beckie, H. J., and Hall, L. M. 2009. Gene flow, invasiveness, and ecological impact of genetically modified crops.
- Zamora, Martin; Massigoge, Jorge; Lopez, Zulma. 2007. Sorgo en el sur.