



Evaluación de la respuesta a la selección de una población de razas locales de maíz (*Zea mays*)



Facundo Bertani

Docente tutor: Dra. Selva Cuppari

Docente consejeros: Dra. Soledad Ureta

Dr. Claudio Pandolfo

Universidad Nacional del Sur Departamento de Agronomía

2024



Agradecimientos

A mis padres, por darme hasta lo que no tenían para que no me falte nada y poder desarrollarme en la carrera que elegí, por siempre aconsejarme y apoyarme en todo y estar en todo lo que precisaba.

A mis hermanos, Mau, Lu y Agus, por aconsejarme y alentarme en la carrera.

A mis amigos de Pringles que, a pesar de no estar juntos, siempre estuvieron apoyándome.

A todos mis amigos que hice en agronomía, gracias por hacer este camino más leve y divertido, por cada juntada, cada mateada y cada salida. Siempre apoyándonos antes y después de cada parcial y final. Gracias por hacerme mejor persona y mejor profesional.

A Selva, mi tutora por ayudarme a llevar este trabajo y aconsejarme. A mis consejeros Claudio y Sole por participar en este proyecto.

Y Gracias a la Universidad Nacional del Sur y al Departamento de Agronomía, por darme una educación pública, gratuita y de calidad.

Índice

Índice de figuras.....	4
Índice de tablas.....	6
Introducción.....	7
Origen y domesticación.....	7
Distribución de la especie	7
Diversidad de razas nativas de maíz en Argentina.....	8
Banco de germoplasma de maíz en Argentina	9
Maíces criollos o nativos	9
Antocianinas.....	10
Características botánicas del maíz	11
Características agronómicas del maíz	12
Ciclo ontogénico.....	13
Programa de mejoramiento de maíz en Argentina	14
Hipótesis.....	16
Objetivos.....	16
Materiales y métodos	17
Condiciones experimentales y material genético.....	17
Caracterización climática	19
Registro de datos a campo.....	19
Mediciones realizadas en postcosecha.....	20
Análisis de caracteres cualitativos	22
Respuesta a la selección.....	23
Resultados y discusión	25
Evaluación a campo.....	25
Evaluación de la floración	28
Evaluación post cosecha	28
Caracteres cualitativos	34
Evaluación de la respuesta a la selección	34
Análisis de espigas individuales.....	35
Conclusiones	36
Anexo	38
Bibliografía	39

Índice de figuras

Figura 1. Maíz Teosinte (izquierda) y maíz moderno (der.).....	7
Figura 2. Espiga de maíz con antocianinas proveniente de la población de maíz utilizada en este trabajo.....	11
Figura 3. Estructura de la planta de maíz.	12
Figura 4. Ciclo ontogénico del maíz.	13
Figura 5. Ubicación del Departamento de Agronomía UNS y campos experimentales. Lote donde se realizó el ensayo señalado con el rectángulo amarillo.	17
Figura 6. Plano de siembra con identificadores internos	18
Figura 7: Lote sembrado con sistema de riego por goteo.....	18
Figura 8. Siembra manual de semillas de maíces criollos y fertilización con fosfato di amónico.	19
Figura 9. a) Espiga o inflorescencia femenina de maíz con estigmas emergidos y b) Panoja o inflorescencia masculina de maíz emergida.	20
Figura 10: Calibre digital utilizado para medir el diámetro de las espigas.....	20
Figura 11. Balanza digital utilizada para pesar los granos de maíz.....	21
Figura 12. Desgranadora manual de maíz.	21
Figura 13. Máquina contadora de granos.....	22
Figura 14. Colores de granos clasificados, modificado de IBPGR (1991).....	22
Figura 15. Disposición de hileras: regular, irregular, recta y en espiral.	23
Figura 16. Respuesta a la selección:	24
Figura 17. Hongo <i>Ustilago maydis</i> presente en espiga de maíz.....	25
Figura 19. Espiga con aparición de inflorescencia masculina en el ápice de la mazorca	27
Figura 20. Número de macollos por planta de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....	27
Figura 21. Longitud de la espiga (cm) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....	29
Figura 22. Diámetro de la espiga (mm) de los individuos evaluados de la población en maíces criollos.....	29
Figura 23. Número de hileras por espiga de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....	30
Figura 24. Número de granos por hilera de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....	31
Figura 25. Número de granos por espiga de los individuos evaluados de la población en maíces criollos.....	32

Figura 26. Peso total de grano por espiga (gr) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....33

Figura 27. Peso de 1000 granos (gr) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.....33

Índice de tablas

Tabla 1. Promedios, desvíos, máximos y mínimos de los caracteres métricos analizados en la población original P_0	23
Tabla 2. Descriptores con sus valores mínimos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Valores promedios, desvíos, máximos y mínimos de los caracteres analizados	28
Tabla 4. Valores promedios de las características estimadas en la población original (X_0), valores promedio de la siguiente generación (población evaluada en este trabajo) (X_1), y respuesta a la selección (R).....	34
Tabla S1. Espigas cosechadas con su ID (número interno identificador) con cada una de las variables consideradas en la evaluación de la respuesta a la selección. La tabla presenta únicamente los valores de las espigas que superaron el valor promedio de la población original	38

Introducción

Origen y domesticación

El maíz o *Zea mays* es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Es una especie que pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas, y es la única cultivada de este género (Paliwal et al. 2001).

Todas las variedades locales de maíz precolombino existentes surgieron del teosinte (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) hace aproximadamente nueve mil años a través de un único evento de domesticación en la cuenca central del río Balsas (sur de México), demostrando así que el maíz es una forma domesticada de *Zea mays* ssp. *parviglumis* (Matsuoka, 2005).

En el proceso de domesticación del maíz se pudo desarrollar una planta robusta, con grandes frutos vistosos (mazorca) donde los granos quedaron envueltos en hojas que los protegían hasta alcanzar la madurez suficiente para ser aprovechados (De Tapia, 1997).

El registro fósil de los restos más antiguos del maíz, encontrados en diversas partes de México, demuestran un gran cambio morfológico desde la pequeña espiga femenina del Teosinte, con unos cuantos granos de fácil dispersión, a la espiga femenina del maíz cultivado con una gran cantidad de granos fuertemente adheridos al raquis (Serratos, 2009) (Fig. 1).

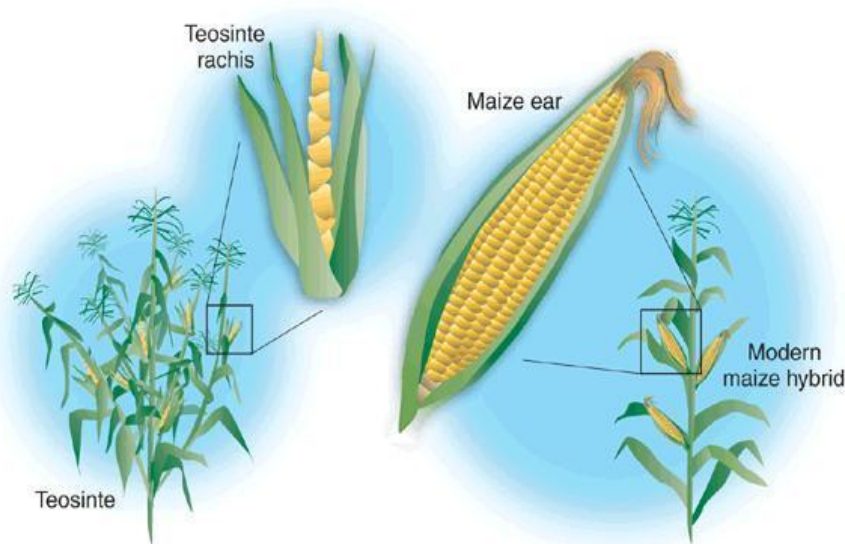


Figura 1. Maíz teosinte (izquierda) y maíz moderno (derecha).

Distribución de la especie

La difusión del maíz hacia varias partes del mundo, a partir de su centro de origen en México, ha sido tan notable y rápida como su evolución a planta cultivada. Los habitantes de varias tribus indígenas de América Central y México llevaron esta planta a otras regiones de América

Latina, al Caribe y después a Estados Unidos de América y Canadá. Los exploradores europeos lo trasladaron a Europa y posteriormente los comerciantes los distribuyeron en Asia y África (Paliwal et al. 2001).

Por otro lado, también llegó a África y al sur de Asia a principios del 1500 por medio de comerciantes portugueses y árabes. Es probable que el maíz haya sido introducido en el noroeste de la región del Himalaya por comerciantes donde posteriormente se difundió a muchas regiones vecinas (Brandolini, 1970).

En China fue introducido a principios del siglo XVI por rutas marítimas y terrestres, y en Japón alrededor de 1580 por navegantes portugueses. Alrededor de 1550 se difundió como un cultivo alimenticio en el sur de Asia y hacia 1650 era un cultivo importante de Indonesia, Filipinas y Tailandia. De esta manera, en menos de 300 años la especie viajó alrededor del mundo y se estableció como un importante cultivo alimenticio en numerosos países (Dowswell et al. 1996).

Diversidad de razas nativas de maíz en Argentina

En Argentina, la historia y por tanto la llegada del maíz hacia sus diferentes ecorregiones, no se vincula al teosinte directamente, cuyas formas no se encuentran en el país, sino al maíz nativo y domesticado, vinculados ambos estrechamente al desarrollo de la cultura aborígen (Carcamo, 2011). El maíz ingresó a la Argentina por dos vías: un camino andino, que tiene a la Puna (Jujuy, Salta), Catamarca y La Rioja como centros de mayor expansión y otro camino atlántico, ingresando por Brasil y expandiéndose a las provincias de Misiones, Chaco y Formosa (Carcamo, 2011).

Las regiones de nuestro país más ricas en variabilidad genética son las del Noroeste Argentino (NOA) y Noreste Argentino (NEA), donde se conocen más de 50 razas nativas de maíz (Eyherabide 2006; Cámara Hernández et al. 2011; Melchiorre et al. 2020).

Con materiales provenientes de Catamarca y Salta los caracteres discriminantes más importantes entre razas podían separarse en: 1) vegetativos: altura de planta y número de hojas, 2) fenológicos como el tiempo de floración y 3) reproductivos: peso, ancho y tamaño de grano. De esta manera, aportaron un mayor grado de entendimiento a las relaciones entre razas nativas (Melchiorre et al. 1992).

Banco de germoplasma de maíz en Argentina

Un banco de germoplasma es un repositorio de semillas, tejidos o plantas que tiene por objetivo preservar la diversidad genética. Las semillas y sus genes son conservados como un recurso a ser utilizado con fines de investigación, incluyendo el mejoramiento genético (Condon y Rossi, 2018).

Existen tres tipos de bancos de germoplasma:

- Bancos base.
- Bancos activos.
- Bancos de trabajo.

En el banco base el objetivo principal es conservar a largo plazo semillas de especies vegetales. En Argentina, el primer banco base fue creado en el año 1991 en la localidad de Castelar y actualmente resguarda más de 32.000 accesiones de 550 especies vegetales. Estas semillas son duplicados de seguridad de la variabilidad genética existente en los bancos fitogenéticos de la RedGen (Red de Recursos Genéticos) y materiales en custodia de otros grupos de INTA y extra-INTA (Malagrina, 2023).

Los bancos activos contienen colecciones que se utilizan para regeneración, multiplicación, distribución, caracterización y evaluación. Deben mantenerse semillas en cantidades suficientes con el fin de estar disponible cada vez que sea necesario.

La Estación experimental Agropecuaria (EEA) de Pergamino inauguró el Banco Activo de Germoplasma de Maíz (BAP). La colección de germoplasma de maíz del BAP corresponde exclusivamente a razas locales nativas que fueron incorporadas desde la década de 1950 hasta el año 2009, cuando se realizó la última de 13 giras que cubrieron la mayor parte del país, donde se colectaron 2469 entradas. Las actividades del BAP enfocadas en el análisis y caracterización de las entradas describieron 44 formas raciales o tipos diferentes de maíces nativos, siendo las provincias de Jujuy y Salta las que presentaron la mayor riqueza de tipos raciales.

La preservación de esta variabilidad genética es esencial para enriquecer la diversidad genética utilizada en los programas de mejoramiento de maíz, ya que hay mucha variación en las razas locales por explorar. Las variedades autóctonas, nativas o criollas de maíz son un valioso recurso para mejorar el rendimiento, la salud y la calidad de los cultivos, ya que contienen genes beneficiosos seleccionados naturalmente a lo largo de muchas generaciones debido a las condiciones ambientales específicas en la que se han desarrollado (Barcelona, 2022).

Maíces criollos o nativos

Como se ha señalado previamente, México es reconocido como el centro de origen y diversidad del maíz. Esta amplia diversidad se ha clasificado en al menos 59 razas, diferenciadas por sus características morfológicas, bioquímicas, genéticas y moleculares. Se ha propuesto una clasificación de las variantes dentro de las razas según tipos o coloración de grano. Esta coloración está determinada por el contenido de pigmentos, como los

carotenoides en los granos amarillos y las antocianinas en los granos azules o rojos (Egesel et al. 2003). Estas variedades pigmentadas están presentes en 41 razas, ya sea por su color en el grano o bien por la presencia de antocianinas en hojas, tallo y mazorca.

Las variedades criollas del maíz contienen genes que le imparten una variabilidad genética de suma importancia. Dentro de estas razas criollas existen accesiones con modificaciones en el color del grano y sus pigmentos, que le confieren propiedades fitoquímicas únicas. Primordialmente existen dos grandes familias de pigmentos asociados al maíz, los de naturaleza fenólica que incluyen a las antocianinas y los carotenoides. Los maíces ricos en carotenoides son ampliamente sembrados en el mundo entero, mientras que los ricos en antocianinas solamente se siembran en áreas muy limitadas (Cárcamo et al. 2011). Es importante resaltar que todos los maíces nativos contienen compuestos fenólicos de alto valor, de modo que los criollos constituyen un reservorio y patrimonio genético por explorar.

Antocianinas

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles de color rojo que se encuentran ampliamente distribuidas en el reino vegetal. El color de las antocianinas depende de varios factores intrínsecos, como los sustitutos químicos que contienen y la posición de estos en el grupo flavilio (Ortiz et al. 2011). Estos pigmentos son interesantes por su impacto sobre las características sensoriales de los alimentos, las cuales pueden influenciar su comportamiento tecnológico durante el procesamiento de alimentos, y por su implicación en la salud humana a través de diferentes vías (De pascual y Sánchez, 2008).

Las antocianinas son de interés particular para la industria de colorantes alimenticios debido a su capacidad para proporcionar colores atractivos (Konczack y Zhang, 2004). La incorporación de antocianinas como colorantes alimenticios son muy benéficas para la salud, mejoran la agudeza visual, actúan como antioxidante, y como agente químico protector, también tiene propiedades antidiabéticas tales como control de lípidos, secreción de insulina y efectos vasoprotectores (Ship y Abdel-Aal, 2010). Al pasar por el tracto digestivo al torrente sanguíneo de los mamíferos, permanecen intactas y ejercen efectos terapéuticos conocidos (cancerígenos, antitumorales, antiinflamatorios y antidiabéticos) (Miyazawa et al. 1999).

La principal fuente de antocianinas son las frutas rojas como bayas y uvas rojas y cereales, principalmente maíz morado (Fig. 2) (Ortiz et al. 2011). Además, están presentes en diferentes órganos de las plantas como flores, tallos, hojas y raíces (Brouillard, 1982).



Figura 2. Espiga de maíz con antocianinas proveniente de la población de maíz utilizada en este trabajo.

Características botánicas del maíz

El maíz es una planta anual que florece en la temporada de verano y se destaca por su mecanismo fotosintético C4 que le confiere una notable eficiencia en la captura de luz solar (Pengelly et al. 2011). Además, se distingue por sus raíces primarias fasciculadas, que se entrelazan vigorosamente con el suelo, y por sus raíces secundarias o adventicias. El tallo del maíz, de forma cilíndrica y estructura hueca, crece erguido sin ramificaciones, adquiriendo una apariencia similar a la de una caña (Montoro et al. 2017). Sus hojas largas y de forma lanceolada, están dispuestas alternadamente a lo largo del tallo, abrazándolo con vainas que le proporcionan soporte y protección (Raven et al. 1992) (Fig. 2).

Una de las características más distintivas del maíz es su patrón de floración, que presenta inflorescencia masculina y femenina en una misma planta, clasificándose como una especie diclino-monoica. La inflorescencia femenina, conocida como espiga, emerge desde yemas situadas en las axilas de las hojas, mientras que la inflorescencia masculina o panoja, se desarrolla desde el extremo superior del tallo, en el ápice (Dimitri y Orfila, 1985) (Fig. 3).

La liberación del polen se inicia en la punta de la panoja y avanza gradualmente hacia la base, mientras que la elongación de los estigmas, receptores del polen, comienza en la parte inferior de la mazorca y progresa hacia arriba. Este intrincado mecanismo asegura una sincronización precisa entre la disponibilidad de polen y la receptividad de los estigmas, optimizando así las posibilidades de fecundación (Ortiz-Torres et al. 2010). Bajo condiciones ambientales favorables y en densidades de siembra habituales, los estigmas emergen unos días después de la antesis, en un fenómeno conocido como "protandria", que contribuye a maximizar la eficiencia reproductiva de la planta. Una mayor coordinación entre la espiga y la panoja potencia aún más las perspectivas de éxito en el proceso de polinización y fecundación del maíz (Montoro et al. 2017).

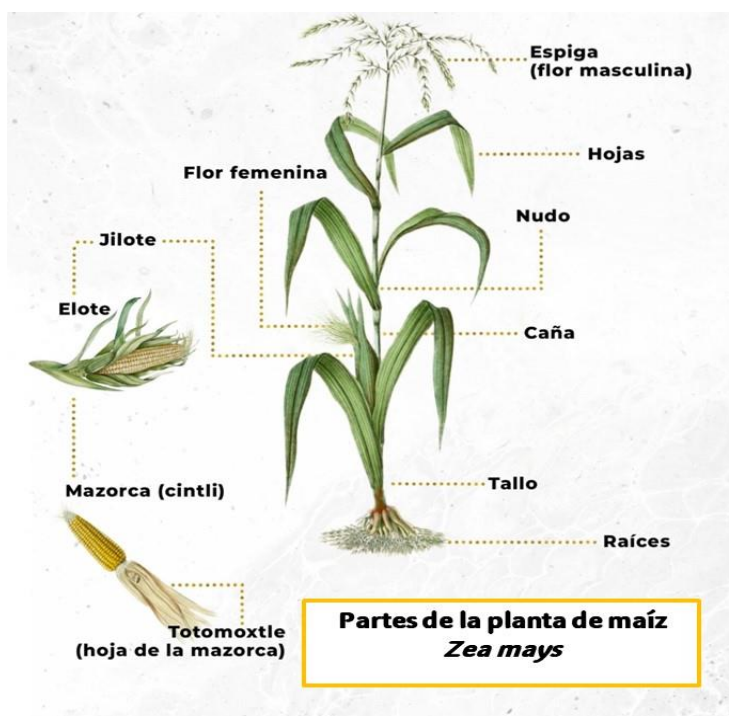


Figura 3. Estructura de la planta de maíz.

Características agronómicas del maíz

El maíz presenta preferencias por los suelos ricos en materia orgánica y adecuadas propiedades físicas y biológicas. El suelo ideal es de textura intermedia, de franco a franco-arcilloso e idealmente bien drenados y aireados. El pH ideal para la siembra es de 5,5 a 7.

La temperatura media diurna mínima para la germinación no debe ser menor a 10 °C. Para el crecimiento soporta temperaturas que van desde 15 °C a 40 °C, siendo el óptimo entre 20 y 30 °C. Para la floración se necesitan temperaturas que oscilen en promedio entre 20 y 30 °C, con días soleados y noches frías. El periodo crítico se sitúa entre 15 días antes de la floración femenina y 15 días posterior a ésta.

El cultivo de maíz es muy sensible a la falta de agua, especialmente en el período entre floración y llenado de grano, ya que el rendimiento podría verse seriamente afectado si se produce sequía durante ese periodo. El requerimiento hídrico es de 500 a 700 mm de precipitación distribuida uniformemente durante el ciclo del cultivo (Ortigoza Guerreño et al. 2017).

La densidad de siembra varía entre 45.000 a 100.000 plantas ha⁻¹, dependiendo del ambiente y el material que se utilice (Tokatlidis y Koutroubas, 2004). La fertilización nitrogenada debe fraccionarse en aplicaciones de inicio, crecimiento vegetativo y floración. Es sensible a la compactación y encostramiento superficial del suelo. Además, es susceptible a plagas como *Diabrotica* spp. y *Spodoptera* spp, malezas, enfermedades como carbón y pudriciones de la

espiga y a virus como el Mal de Río Cuarto, enfermedad viral más importante de Argentina (Pereyra et al. 2015).

Ciclo ontogénico

El ciclo ontogenético o fenología del maíz comprende dos fases principales: la fase vegetativa y la fase reproductiva (Fig. 4).

Fase vegetativa:

- Germinación y emergencia: ocurren entre 4-8 días después de la siembra, dependiendo de la temperatura del suelo y la humedad.
- Crecimiento vegetativo: comprende la aparición secuencial de las hojas y la elongación de los entrenudos del tallo. Se completa cuando la planta presenta la lámina de la hoja bandera completamente expandida.
- Macollamiento: emisión de macollos en variedades no híbridas.

Fase reproductiva:

- Inicia con la diferenciación de la panoja y la espiga, aproximadamente 30-45 días después de la emergencia.
- Floración o antesis: ocurre con la emergencia de estigmas y liberación de polen. Dura aproximadamente 2 semanas.
- Formación y llenado de granos: el grano alcanza su máximo peso seco a los 60-90 días después de floración.
- Madurez fisiológica: cuando el grano llega a su máximo peso con un contenido de humedad aproximado de 35 %.

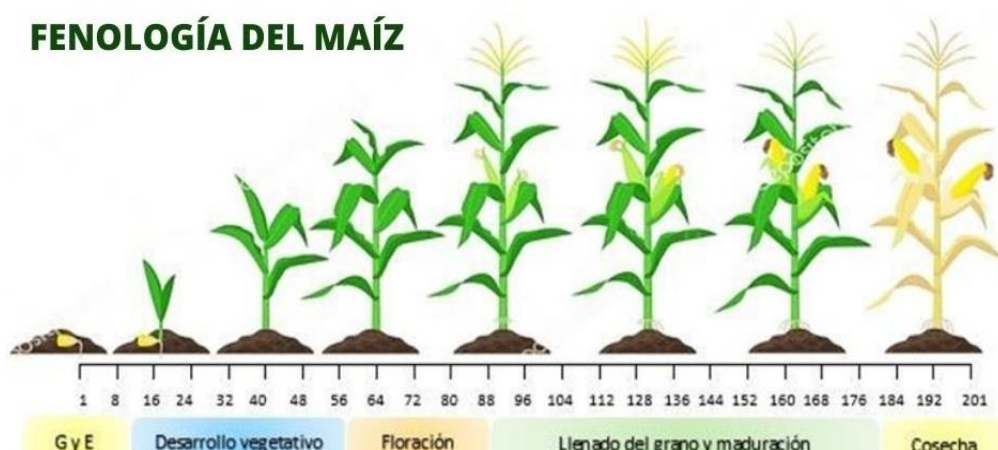


Figura 4. Ciclo ontogénico del maíz.

Programa de mejoramiento de maíz en Argentina

El mejoramiento genético se basa en la aplicación de selección artificial a fin de mejorar caracteres de interés agronómico. En maíz los agricultores fueron “modelando” las variedades autóctonas mediante la selección de tipos de plantas y espigas que mejor se adaptaban a cubrir sus necesidades de alimentación (Eyherabide, 2006). La amplia diversidad presente en el territorio argentino sirvió como base para la selección de materia prima en los programas de mejoramiento.

Un método de selección muy utilizado en los planes de mejoramiento de maíz es la selección masal, el cual se basa en la selección de individuos con características deseables que se encuentran dentro de una población heterogénea (variabilidad genética). En este método se realiza la selección de acuerdo a sus características visuales (selección fenotípica), y a los objetivos que se pretende alcanzar. Las semillas de las plantas seleccionadas se mezclan y se siembran en el siguiente ciclo, formando una nueva generación con un aumento de los individuos que llevarán las características deseables de las plantas seleccionadas o progenitoras.

Con el uso de la selección masal en maíz es posible lograr incrementos en el rendimiento o mejorar algunas características agronómicas de la planta como: altura de planta, altura de mazorca, cobertura de mazorcas, plantas fuera de tipo, ciclo del cultivo (precocidad), aumento de la cantidad de mazorcas por planta (prolificidad), tipo y color de grano, sincronización en la polinización, etc. La adaptación de una nueva variedad a un determinado ambiente, puede justificar el uso de la selección masal. El éxito de este método depende de la cantidad de plantas seleccionadas y de las características a mejorar. Es importante que la muestra seleccionada sea lo suficientemente grande para impedir la endogamia, que conlleva, a menudo, a una disminución del rendimiento del cultivo o la aparición de características agronómicas indeseables. Lo importante es mantener la polinización cruzada entre varias plantas, cuyas recombinaciones produzcan una mejora en los caracteres seleccionados para el siguiente ciclo (Saquimux, 2011).

Con el transcurso del tiempo, las variedades de maíz tradicionales fueron reemplazadas por los híbridos debido a su mayor rendimiento, gracias al fenómeno conocido como heterosis o vigor híbrido. El vigor híbrido se define como la superioridad del híbrido en comparación con sus progenitores, lo que aumenta la expresión de ciertas características (De la cruz et al. 2010). Los híbridos se generan artificialmente cruzando líneas puras consanguíneas, producidas mediante sucesivas autofecundaciones. Estas líneas son homogéneas y homocigóticas, y al cruzarlas entre sí, generan una descendencia completamente heterocigótica, donde todas las plantas son genética y fenotípicamente uniformes. Además, estas plantas híbridas manifiestan características de mayor tamaño y vigor que sus progenitores (Cubero, 2013). En Argentina, el maíz se comercializa mayoritariamente bajo esta estructura genética. Estos híbridos comerciales se diferencian por sus características físicas y adaptación al ambiente, como por ejemplo *Zea mays indurata* (maíz duro), *Z. mays everta* (pisingallo) y *Z. mays identata* (dentado) (Acosta, 2009). La gran diferencia que hay

entre los híbridos comerciales y las razas autóctonas es la variabilidad genética presente en éstas últimas.

En este trabajo se realizó la evaluación del avance genético a partir de un set de plantas de una población segregante de maíces criollos, seleccionadas previamente en el trabajo final de carrera de la ingeniera agrónoma Jorgelina Barcelona (2022). Los materiales utilizados provienen de plantas que presentaron un macollo/planta, una espiga/macollo, buena sanidad y resistencia al vuelco, mientras que difirieron en otras características fenotípicas como color, forma y tamaño de las espigas, altura de la planta, entre otras. Si bien la respuesta a la selección no arrojó resultados muy alentadores, ya que los promedios de las variables analizadas fueron similares a los correspondientes de la población original, o a penas superiores y en algunos casos inferiores, se obtuvieron genotipos superiores que podrían ser considerados en futuras evaluaciones.

Hipótesis

1. El análisis de caracteres asociados a rendimiento y sanidad, presente en una población de maíz previamente seleccionada, permite evaluar el avance genético obtenido.
2. Los genotipos utilizados para la evaluación de la selección permiten obtener una generación de plantas con mayor rendimiento y uniformidad en los caracteres seleccionados.

Objetivos

- 1- Evaluar la respuesta a la selección de una población de maíz previamente seleccionada, a través de caracteres fenotípicos a campo y en el laboratorio.
- 2- Seleccionar individuos superiores en los caracteres analizados para la siguiente generación.

Materiales y métodos

Condiciones experimentales y material genético

En este estudio se utilizaron semillas provistas por la cátedra de Genética Básica y Aplicada del Dpto. de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, de un set de 34 plantas seleccionadas en la campaña 2021/22 de una población segregante de maíces criollos, provenientes del trabajo de intensificación de la Ing. Agr. Jorgelina Bercelona (2022).

La siembra se llevó a cabo durante los años 2022/23 en una parcela ubicada en el predio del Departamento de Agronomía, en el complejo de Palihue de la Universidad Nacional del Sur (Fig. 5). Antes de efectuar la siembra se preparó el suelo, rastreando y emparejando el lote para dejarlo libre de malezas. Además, se instaló un sistema de riego por goteo y estacas con sus respectivos rótulos (Fig. 6).



Figura 5. Ubicación del Departamento de Agronomía UNS y campos experimentales. Lote donde se realizó el ensayo señalado con el rectángulo amarillo.

Borde					
M1-15	M2-61	M4-51	M4-52	M3-49	M1-61
M1-16	M4-18	M2-6	M3-48	M2-89	M3-71
M4-52	M4-39	M4-48	M1-61	M1-36	M3-16
M1-70	M2-38	M2-79	M4-43	M2-72	M3-93
M2-89	M3-66	M3-28	M2-68	M2-5	M2-61
M4-15	M1-35	M3-49	M2-29	M2-74	M4-52
M3-48	M3-93	M1-58	M4-51	M1-16	M3-41
M1-36	M3-41	M4-18	M2-38	M3-9	M1-15
M2-72	M1-61	M1-70	M4-48	M4-5	M4-39
M2-79	M3-71	M4-39	M1-35	M3-28	M4-43
M2-5	M3-16	M1-15	M3-93	M2-6	M2-68
M3-66	M2-29	M2-89	M2-74	M3-66	M4-51
M1-58	M4-43	M4-15	M2-61	M1-58	M2-29
M3-9	M2-74	M2-5	M3-41	M4-18	M4-15
M3-28	M1-16	M1-36	M3-16	M1-70	M2-38
M2-6	M4-48	M3-9	M3-71	M1-35	M3-48
M3-49	M2-68	M2-72	M4-5	M2-79	M4-5
Borde					

Figura 6. Plano de siembra con identificadores internos. En los bordes se sembró una línea de un mismo genotipo.

La siembra se realizó el 26 de octubre de 2022 en un total de seis líneas, distanciadas entre sí a 70 cm y 30 cm en la línea, con tres repeticiones de cinco semillas de cada uno de los 34 genotipos distribuidas al azar (510 plantas en total) (Fig. 7). Al momento de la siembra se aplicó fosfato diamónico DAP (18-20-0) (Fig.8).



Figura 7: Lote sembrado con sistema de riego por goteo.



Figura 8. Siembra manual de semillas de maíces criollos y fertilización con fosfato di amónico.

Caracterización climática

Las precipitaciones registradas en el periodo desde la siembra del cultivo hasta la cosecha, en los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero, fueron de 225 mm, con una temperatura media promedio de esos meses de 22,16 °C y la máxima fue de 34,5 °C. La humedad relativa fue de 44,1 %.

Registro de datos a campo

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo se registraron datos como pérdida de plantas o plantas poco desarrolladas, vuelco, presencia de plagas y/o enfermedades. Además, se registraron las fechas de emergencia, floración masculina y femenina por planta, el número de macollos por planta y el número de espigas por planta. El registro de la fecha de floración masculina se realizó con la aparición del ápice de la panoja y el de la floración femenina con la aparición de los estigmas en el ápice de la espiga (Fig. 9 a y 9b).

Las fechas de floración se analizaron teniendo en cuenta los siguientes conceptos:

1. Floración masculina o días a antesis: es el número de días desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas ha liberado el polen.
2. Floración femenina o días hasta la emisión de estigmas: número de días desde la siembra hasta que emergen los estigmas en el 50 % de las plantas.
3. Protandria: ocurre cuando la panoja libera el polen antes de la formación de los estigmas.

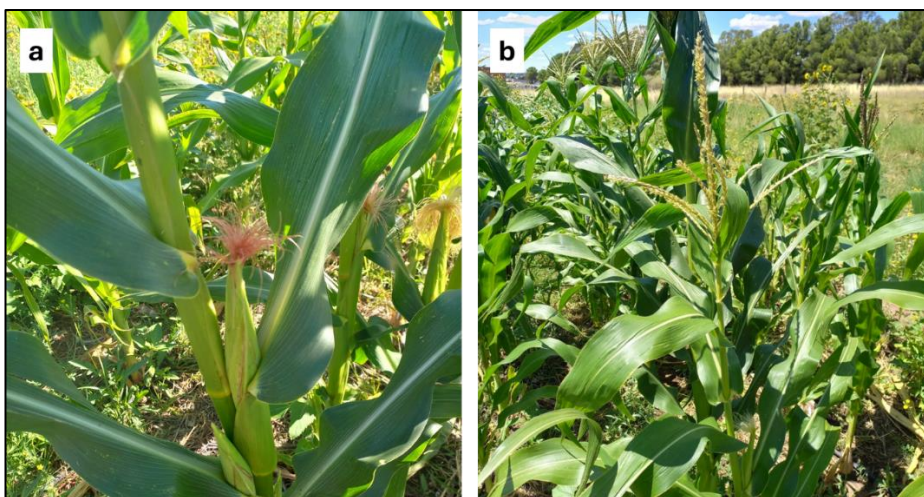


Figura 9. a) Espiga o inflorescencia femenina de maíz con estigmas emergidos y b) Panoja o inflorescencia masculina de maíz emergida.

La cosecha se realizó el 31 de marzo de 2023 de manera manual colocando las espigas de cada planta en bolsas de papel madera con su identificación (número de planta, número de línea y fecha).

Mediciones realizadas en postcosecha

Las espigas cosechadas fueron llevadas al laboratorio de Genética del Depto. de Agronomía y se realizaron las siguientes determinaciones:

- Número de espigas totales por planta: se contaron todas las espigas contenidas en los sobres provenientes de la cosecha de planta individuales.
- Longitud de la espiga: medida con regla desde la base al ápice de la espiga principal de cada planta.
- Diámetro de la espiga: medición de la parte media de la espiga principal, utilizando un calibre digital (Fig. 10).



Figura 10: Calibre digital utilizado para medir el diámetro de las espigas.

- Número de hileras por espiga: contando las hileras de la espiga principal.
- Número de granos por hileras: contando los granos presentes en una hilera.

- Número de granos por espiga: se obtuvo multiplicando el número de granos por hilera por el número de hileras totales de la espiga.

$NGE = N \text{ de granos/hilera} \times N \text{ de hileras/espiga}$

- Peso de la espiga: pesando la espiga principal sin trillar en una balanza digital (Fig. 11).



Figura 11. Balanza digital utilizada para pesar los granos de maíz.

- Peso total: se realizó el desgrane de la espiga principal de cada planta con una desgranadora manual (Fig. 12) y se pesaron la totalidad de los granos de cada una.



Figura 12. Desgranadora manual de maíz.

- Peso de 1000 granos (PMG): se calculó realizando el peso promedio de tres repeticiones de 100 granos multiplicado por 10, que se contabilizaron con una maquina contadora de granos marca ELE (Fig. 13).



Figura 13. Máquina contadora de granos.

Análisis de caracteres cualitativos

Para la identificación de los distintos colores de granos se utilizaron los descriptores de IBPGR (1991) (Fig. 14):



Figura 14. Colores de granos clasificados, modificado de IBPGR (1991).

Para determinar la forma de la espiga se tuvieron en cuenta tres tipos según IBPGR, 1991:

- a) Cónicas.
- b) Cilíndricas.
- c) Cilíndricas cónicas.

Con respecto a la disposición de hileras (Fig. 15) de la espiga se clasificó según IBPGR, 1991 en:

- a) Regular.
- b) Irregular.
- c) Recta.
- d) Espiral.

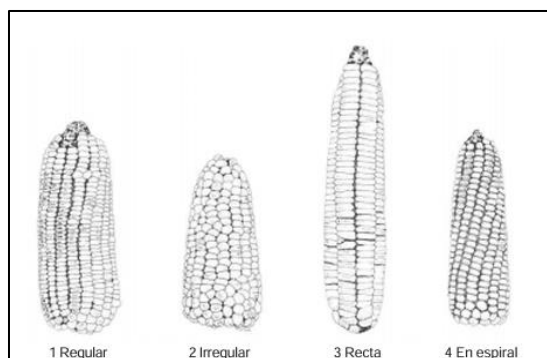


Figura 15. Disposición de hileras: regular, irregular, recta y en espiral.

Respuesta a la selección

Se analizaron caracteres cuantitativos que están relacionados con el rendimiento. Como el rendimiento *per se* presenta baja heredabilidad, ya que está determinado por muchos genes, la selección a través de sus componentes, como por ejemplo el número y el peso de los granos, permiten obtener genotipos superiores. La heredabilidad es la proporción de la variación fenotípica total explicada por el genotipo.

Los materiales utilizados en este estudio provienen de un set de plantas seleccionadas por los siguientes descriptores: longitud de la espiga (LE), diámetro de la espiga (DE), número de hileras por espiga (NHE), números de granos por hilera (NGH), número de granos por espiga (NGE), peso total de los granos (PTG) y peso de 1000 granos (PMG) (Tabla 1). A su vez, se tuvo en cuenta el número de macollos por planta y número de espigas en macollo, seleccionando aquellas plantas que poseían un macollo y una espiga, respectivamente.

Tabla 1. Promedios, desvíos, máximos y mínimos de los caracteres métricos analizados en la población original Po (Barcelona, 2022). Longitud de espiga: LE; diámetro de la espiga: DE; número de hileras por espiga: NHE; número de granos por hilera: NGH; número de granos por espiga: NGE; peso total de los granos: PTG; peso de 1000 granos: PMG.

	LE (cm)	DE (mm)	NHE	NGH	NGE	PTG (gr)	PMG (gr)
Media	15,11	35,59	12,36	26,99	339,94	96,95	278,95
Desvío	3,85	6,18	1,92	10,05	140,38	40,1	42,34
Max	25,5	49,5	20	53	756	217,13	366,3
Min	5	3,16	6	5	50	4,24	213,4

Para calcular la respuesta a la selección es necesario considerar: $R = \bar{X}_1 - \bar{X}_0$.

Donde R es la respuesta a la selección, \bar{X}_1 es el promedio de la población en estudio y \bar{X}_0 es el promedio de la población original.

La Figura 16 muestra un esquema que ejemplifica el cálculo de la respuesta a la selección. Cabe destacar que en esta Figura se pueden observar parámetros que fueron considerados anterior a esta tesis, utilizados para realizar la selección (Barcelona, 2022).

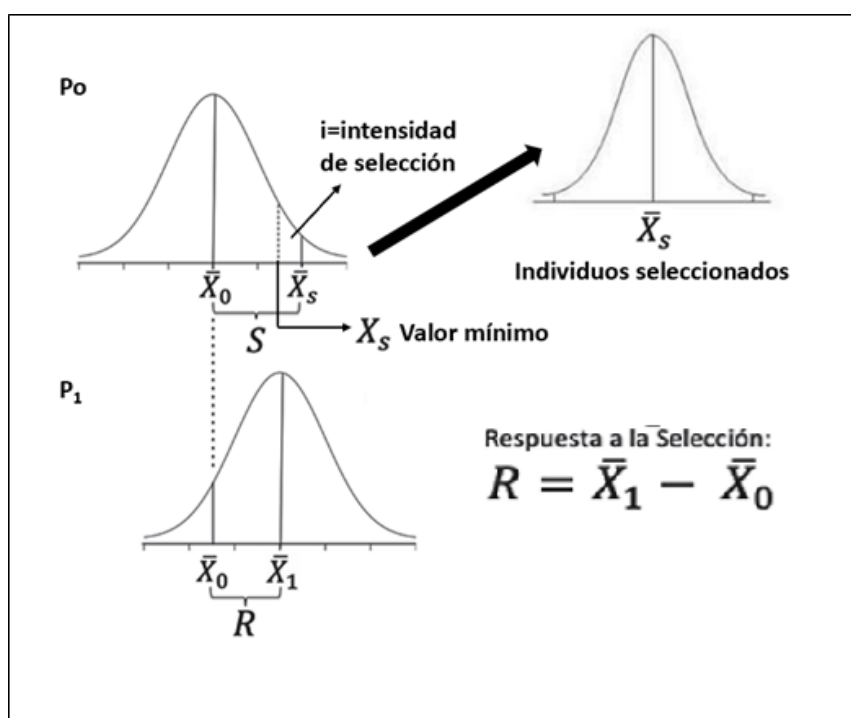


Figura 16. Respuesta a la selección: \bar{X}_0 : promedio de la población original; X_s : valor mínimo a partir del cual se realizó la selección; \bar{X}_1 : promedio de la población siguiente; R : respuesta a la selección; S : diferencial de selección; P_0 : población original y P_1 : población generada a partir de P_0 .

Resultados y discusión

Evaluación a campo

La evaluación de las plantas a campo permitió observar características de interés como: sanidad, granos morados, rojos y púrpuras (considerados como presencia de antocianinas), chalas y hojas, floración masculina, floración femenina y vuelco.

Desde el punto de la sanidad se obtuvieron buenos resultados, ya que solo se observaron espigas afectadas por el hongo *Ustilago maydis* (carbón de la espiga de maíz) en el 2 % de las espigas, en comparación con la incidencia de este hongo en la población antecesora tubo el 6% de espigas afectadas (Fig.17). Este hongo provoca daños en las espigas en estadio de llenado de grano, generando mermas en el rendimiento (Verduzco et al. 2020). Además, no se observaron otras enfermedades. Según Oreamuno-Fonseca (2018), los maíces criollos no suelen ser afectados por enfermedades. A todo esto, Biasutti (2021) describe que los materiales de polinización abierta presentan una mejor adaptación a enfermedades que los maíces híbridos.

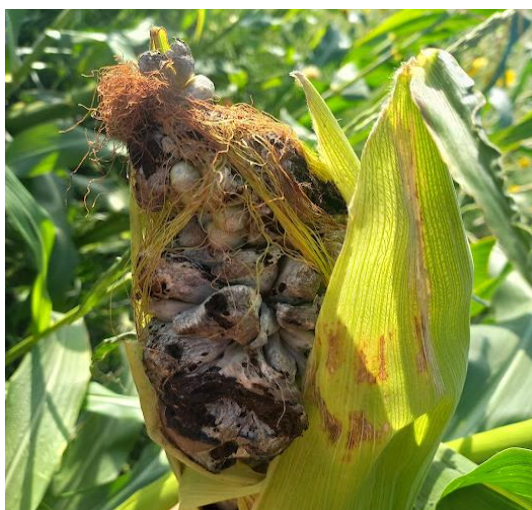


Figura 17. Hongo *Ustilago maydis* presente en espiga de maíz.

Las plantas con antocianinas (granos morados, rojos y púrpuras) y volcadas representaron un 20 % y un 9 %, respectivamente. Se sugiere que, el valor de plantas volcadas es bajo considerando que, en la actualidad, aun los híbridos comerciales actuales presentan un porcentaje de vuelco de entre 2 y 8 %. Es importante mencionar que se realizó una selección negativa en relación al vuelco, ya que las plantas volcadas fueron descartadas. En relación al porcentaje de granos con antocianinas, se considera que el porcentaje fue elevado, ya que no fue un carácter tenido en cuenta en la selección.

El número de espigas por planta varió entre una a seis, donde el 34 % presentó una espiga, el 48 % dos y el resto tres o más (Fig. 18). El primer valor resultó bajo comparado con el de la población progenitora, ya que más del 50 % del total de las plantas analizadas, presentaron una sola espiga (Barcelona, 2022). Por otro lado, se observó que las plantas que dieron dos espigas por lo general mostraron buen llenado de granos, esto es un comportamiento de interés para los productores ya que podría llegar a dar lugar a buenos rindes. La selección por prolificidad (carácter genético que define la capacidad de producir dos o más espigas), es una característica utilizada cuando el objetivo es aumentar el rendimiento, sin embargo, es importante considerar que el tamaño final de la espiga estará condicionado por el potencial del cultivo donde, además del genotipo, son claves las condiciones climáticas durante el desarrollo del mismo.

En cambio, las plantas en las que se formaron tres espigas no exhibieron tamaños uniformes entre ellas y no fueron potencialmente aptas para llenar granos.

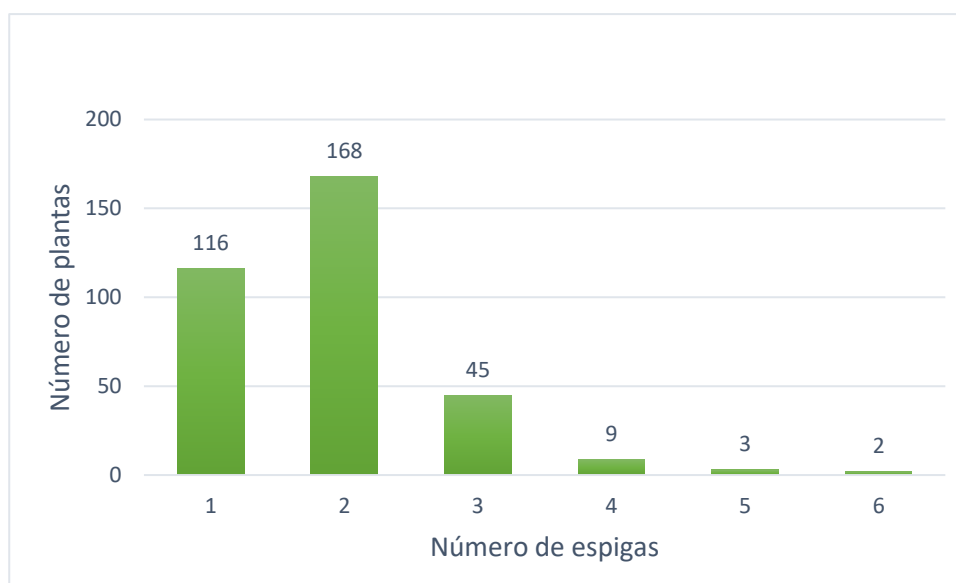


Figura 18. Número de espigas por planta de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

Además, también se observó un cambio morfológico en la espiga denominado “tassel-ears”, en un 13 % del total de plantas, que ocurre cuando en el ápice de la inflorescencia femenina se desarrolla una inflorescencia masculina (Fig.19). Esto se puede deber a un desbalance hormonal frente a estrés ambiental (Bonnet, 1948).



Figura 19. Espiga con aparición de inflorescencia masculina en el ápice de la mazorca.

En cuanto al número de macollos, el 93 % del total de las plantas presentó un macollo, donde todos presentaron al menos una espiga fértil (Fig. 20). Este resultado coincide con los de la población original, ya que la mayoría de las plantas presentaron un macollo por planta (Barcelona, 2022). Así mismo es consistente con la selección realizada para este carácter, dado que todas las semillas utilizadas provienen de plantas con un macollo. En general, se busca que las plantas no tengan más de un macollo ya que eso podría afectar el rendimiento debido a que los fotoasimilados deben ser distribuidos y, en consecuencia, el llenado de granos no se complete en las espigas presentes en cada macollo (Rotili et al. 2020). Sin embargo, la capacidad de macollaje en maíz puede ser un rasgo de interés si el objetivo es producir forraje o ensilar plantas enteras.

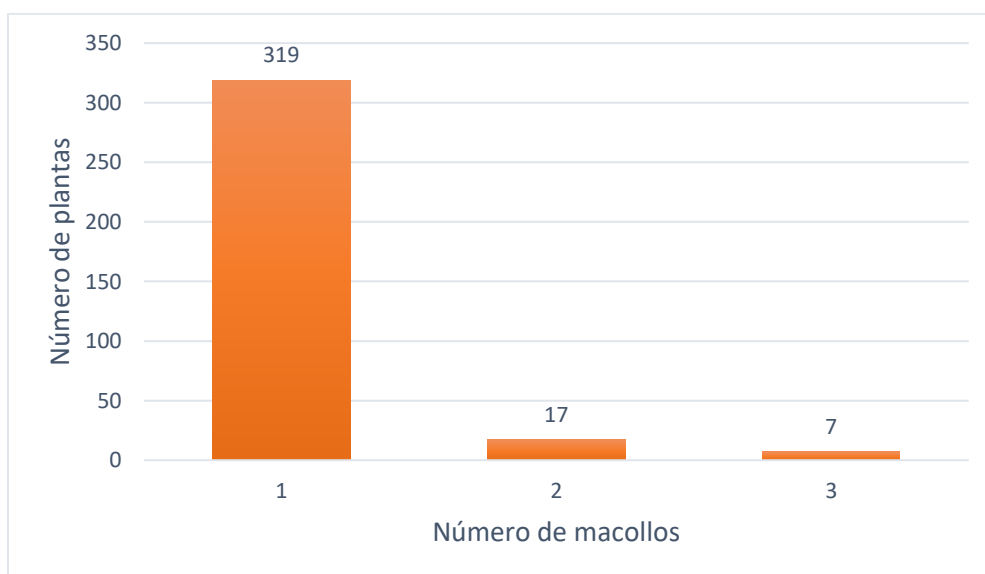


Figura 20. Número de macollos por planta de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

Evaluación de la floración

El promedio de días entre emergencia de la panoja y la espiga fue de 13, con un rango de 2 a 36 días, dando una ventana elevada de floración, en comparación con un híbrido comercial, por ejemplo, que no supera los 7 días. Este valor promedio en los progenitores fue de 10 días (Barcelona, 2022).

La floración es la etapa donde el desarrollo del cultivo es más sensible al estrés ambiental, denominándose periodo crítico, criterio considerado en los programas de mejoramiento (Alvarez, 2015). Se sugiere que la floración masculina ocurrió de manera acelerada debido a la baja humedad ambiente y las altas temperaturas presentadas en el momento de desarrollo de las panojas.

Evaluación post cosecha

La Tabla 2 muestra las variables analizadas en el post cosecha en los promedios de cada una de las siete variables consideradas para realizar la evaluación de la respuesta a la selección

Tabla 2. Valores promedios, desvíos, máximos y mínimos de los caracteres analizados. Longitud de espiga: LE; diámetro de la espiga: DE; número de hileras por espiga: NHE; número de granos por hilera: NGH; número de granos por espiga: NGE; peso total de los granos: PTG; peso de 1000 granos: PMG.

	LE (cm)	DE (mm)	NHE	NGH	NGE	PTG	PMG (gr)
Media	15,99	36,75	11,74	31,22	366,91	83,90	260,55
Desvío	3,89	5,23	1,90	8,45	117,03	36,05	56,52
Max	26,10	71,65	18,00	58,00	792,00	207,38	421,50
Min	7,08	23,71	8,00	10,00	117,00	17,28	78,10

En lo que respecta a longitud de la espiga, se observó una elevada variabilidad, donde el 43 % presentó una longitud de 20 cm (Fig. 21), mientras que el 33 % de 15 cm. El promedio fue de 15,99 cm \pm 3,89, con un rango de 7,08 a 26,10 cm. En comparación con los progenitores, los valores fueron muy similares, siendo el promedio y el desvío de 15,11 cm \pm 3.85 cm. Estos resultados sugieren que se trata de un carácter poco heredable y, por lo tanto, muy influenciado por el ambiente. La longitud de la espiga se determina las últimas semanas anteriores de la aparición de las panojas, donde condiciones de estrés en este momento, puede reducir el tamaño de la espiga (DuPont Pioneer, 2024).

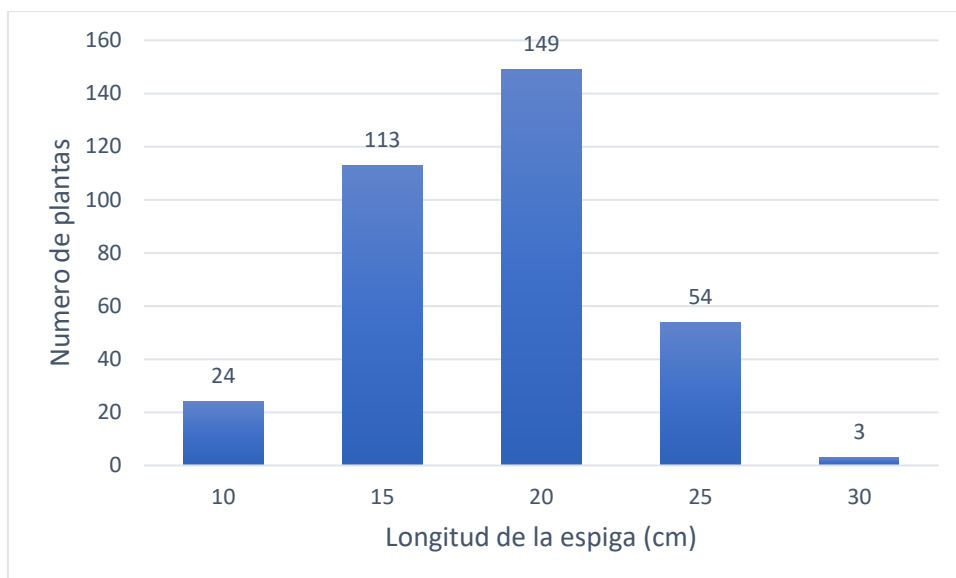


Figura 21. Longitud de la espiga (cm) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

Para diámetro de la espiga, el promedio y desvío fueron de 36,75 mm \pm 5,23 mm, mientras que el mínimo fue de 23,71 mm y el máximo 71,65 mm. La distribución de los datos presentó una curva sesgada hacia la izquierda donde la mayor concentración estuvo representada en el 40 % del total de plantas, con un valor aprox. de 40 mm, el 30 % alrededor de 35 mm y el 17 % alrededor de 45 mm (Fig. 22). Comparando estos resultados con la población original, se deduce que, en relación al promedio, éste fue superior, siendo 35,59 mm, mientras que la curva de ésta presentó una distribución normal simétrica con un valor máximo de alrededor de 50 mm, por lo tanto, para este parámetro se obtuvieron algunas espigas que superaron el valor más alto de la población original.

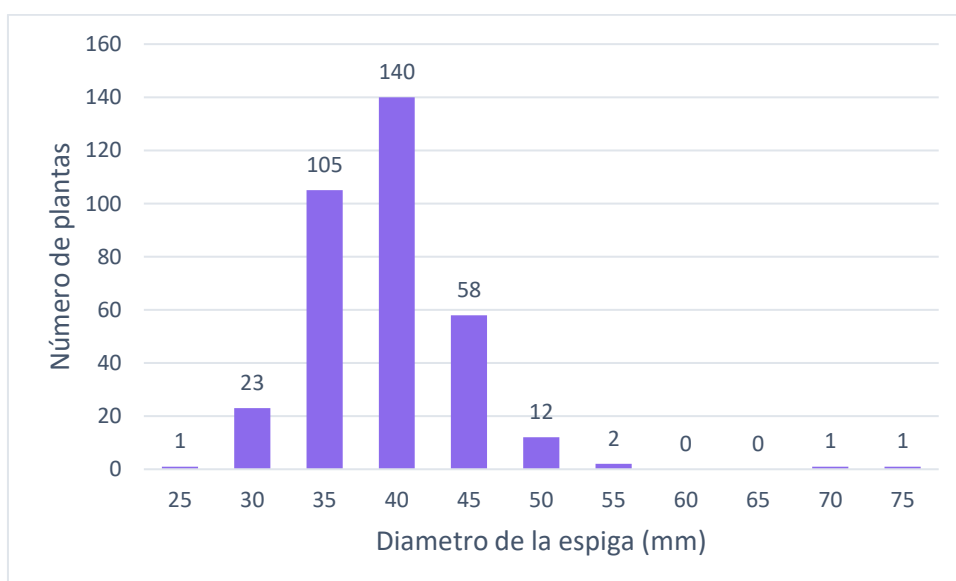


Figura 22. Diámetro de la espiga (mm) de los individuos evaluados de la población en maíces criollos.

En relación al número de hileras por espiga (NHE), la Figura 23 muestra una distribución normal simétrica. El promedio fue de $11,74 \pm 1,9$, con un rango de 8 a 18 hileras/espiga. En Barcelona (2022) el promedio y el desvío fueron de $12,36 \pm 1,92$ hileras/espiga, sugiriendo que este carácter no fue heredable. Este resultado no coincide con Pagano et al (2007), dado que describe que el NHE posee elevada heredabilidad, por lo que tiene poca o nula influencia del ambiente.

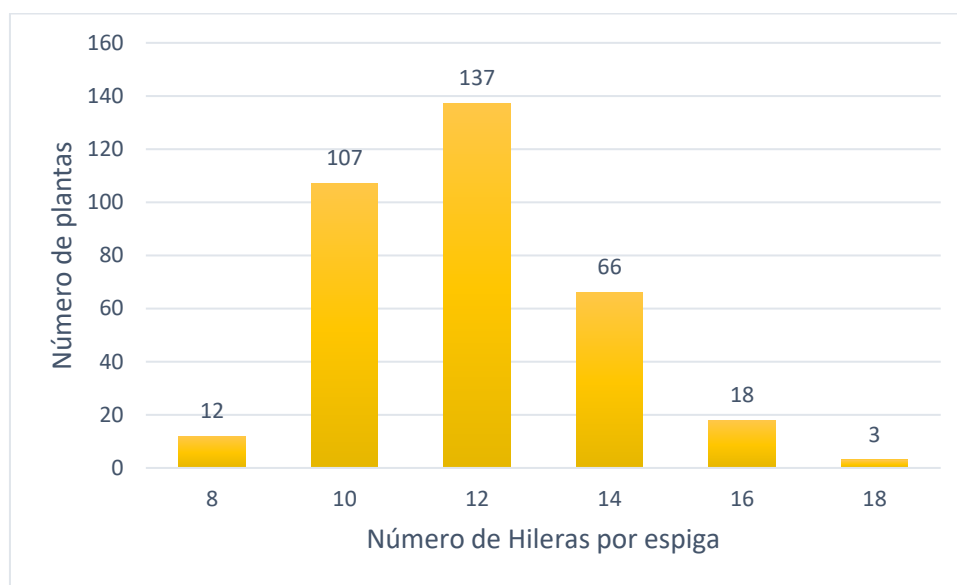


Figura 23. Número de hileras por espiga de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

En la Figura 24 se puede observar una distribución normal simétrica para el número de granos por hilera (NGH), mostrando elevada variabilidad, con un valor promedio de $31,22 \pm 8,45$, y un rango de 10 a 58. El valor promedio y el desvío obtenidos para esta variable resultaron superiores a los de la población original ($26,9 \pm 10,05$). Este resultado podría interpretarse como un carácter heredable y poco influenciado por el ambiente, sin embargo, se trata de un parámetro, sensible a las condiciones ambientales, ya que su diferenciación ocurre desde inicios de la floración femenina hasta una o dos semanas antes de la emergencia de los estigmas (Andrade et al. 2023).

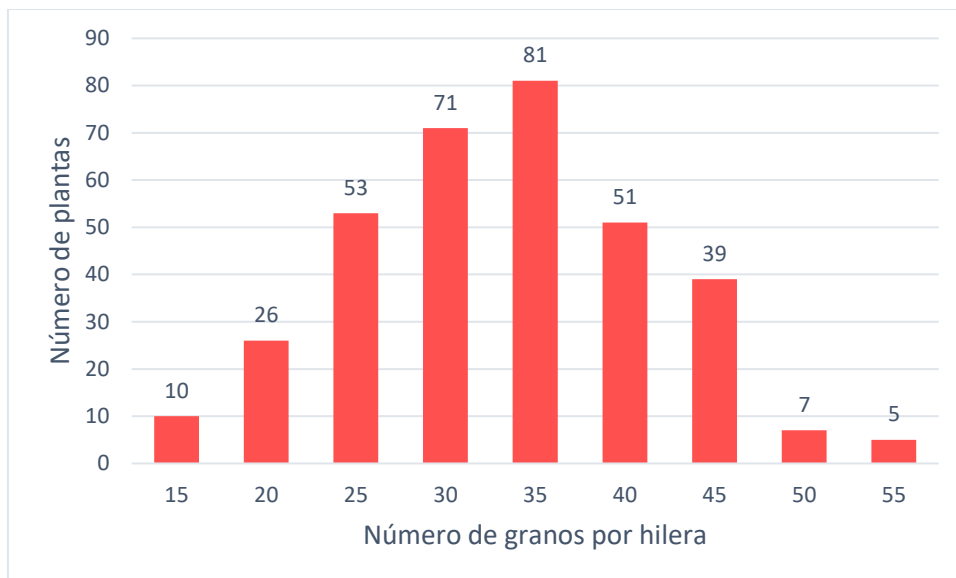


Figura 24. Número de granos por hilera de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

En cuanto al número de granos por espiga (NGE), el valor promedio fue de $366,91 \pm 117,03$ demostrando así una gran variabilidad para este carácter con un rango de 117 a 792. En la Figura 25 se puede observar que la mayoría de los datos están distribuidos hacia la izquierda (sesgo negativo), es decir, hacia valores más bajos de NGE, donde las barras más elevadas están representadas por valores entre 300 y 400 NGE. Cuando se compara con la población original (Barcelona, 2022), el valor promedio, mínimo y máximo resultaron inferiores; 339,94, 50 y 756, respectivamente. Este carácter es el más importante en la determinación de rendimiento para la mayoría de las condiciones ambientales y de manejo, es decir, la variación en el rendimiento del maíz se explica en gran medida por la variación en el número de granos por unidad de superficie (Cerrudo et al., 2020). El otro componente principal es el peso de los granos, el que contribuye menos a la variación del mismo, ya que en general, es más estable que el número de granos en la mayoría de las condiciones de crecimiento (Andrade et al. 2023).

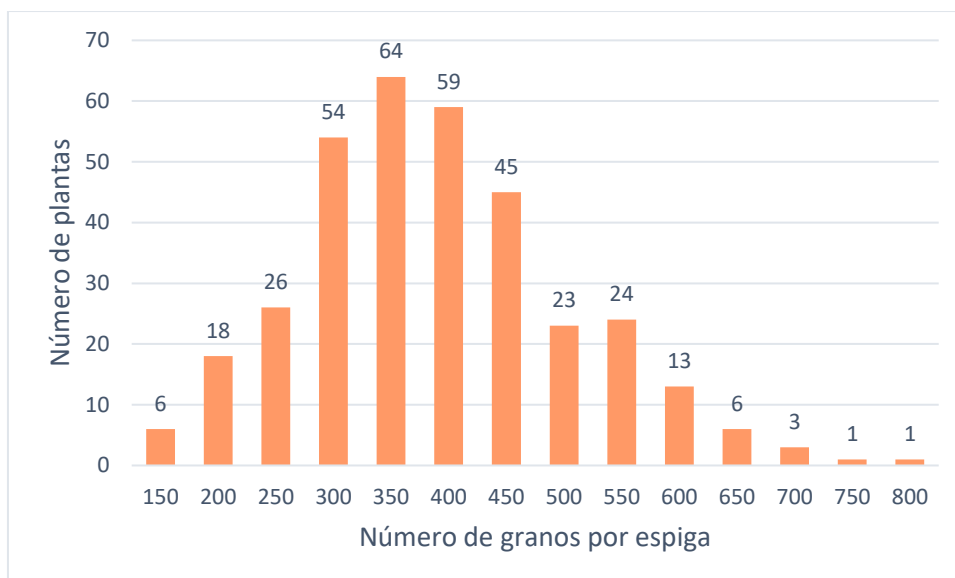


Figura 25. Número de granos por espiga de los individuos evaluados de la población en maíces criollos.

La Figura 26 muestra una distribución normal sesgada hacia la izquierda, con un valor promedio de peso total de granos por espiga (PTG) de $83,90 \pm 36,06$ gr dentro de un rango muy amplio de valores; $17,28 - 207,38$ gr. Estos resultados fueron inferiores a los de la población original, donde el promedio, desvío estándar, mínimo y máximo fueron $96,95 \pm 40,10$ gr, 4 y 217 gr, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, este componente junto al número de granos, es un carácter principal determinante del rendimiento. El peso potencial que puede alcanzar el grano difiere del peso que alcanza a madurez fisiológica, debido a factores agronómicos y ambientales, como la fecha de siembra, densidad, nitrógeno disponible, temperatura y estrés hídrico, así como también de factores intrínsecos del genotipo como el ciclo ontogénico y la tolerancia al estrés, que pueden limitar la disponibilidad de asimilados durante la etapa de llenado del grano (Corona-Mendoza, 2012). Por lo expuesto anteriormente, se deduce que no se observaron diferencias importantes en el promedio de esta variable en comparación con la de la población original, posiblemente debido a las condiciones ambientales presentes a lo largo del desarrollo del cultivo.

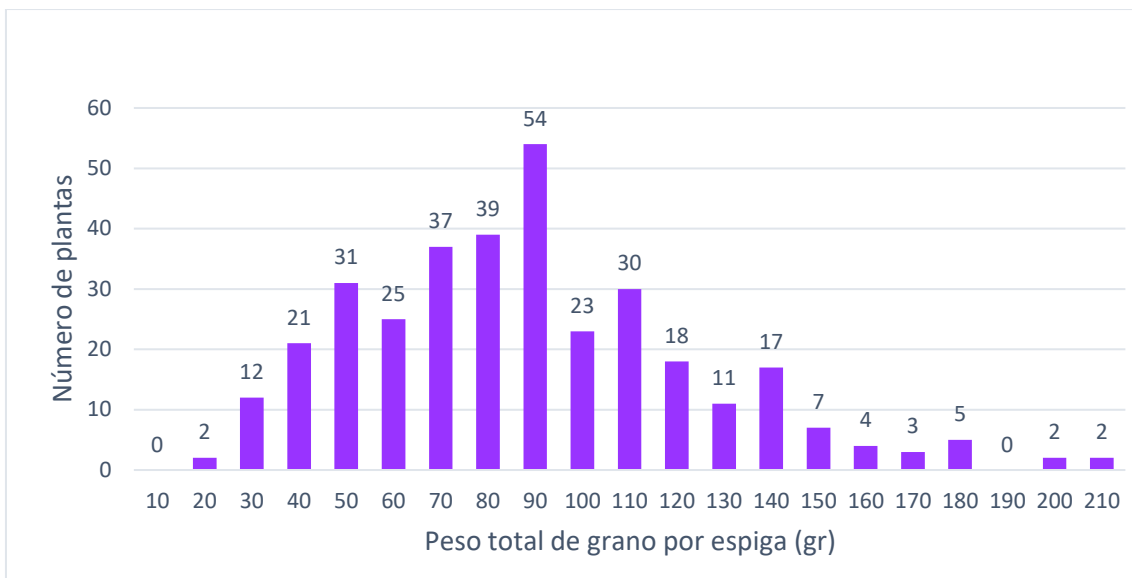


Figura 26. Peso total de grano por espiga (gr) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

En cuanto al peso de 1000 granos, el promedio y desvío obtenidos fueron $260,55 \pm 56,52$ gr, evidenciando una elevada variabilidad, que se puede observar en la Figura 27. El mínimo y el máximo fueron 421,5 gr y 78,1 gr, respectivamente. Si bien el promedio fue inferior al obtenido en Barcelona (2022) ($278,95$ gr \pm $42,30$ gr) el valor máximo (366,3 vs 421,5) fue mayor en la población evaluada, sugiriendo la obtención de algunas plantas superiores para este carácter.

Las condiciones estresantes como escasez de agua, producen reducción en el peso de los granos debido a una menor acumulación de reservas. Por otro lado, altas temperaturas pueden acelerar la madurez y acortar el periodo de llenado resultando en granos más livianos, deficiencias nutricionales que pueden limitar el desarrollo y llenado de granos (Andrade et al. 2023).

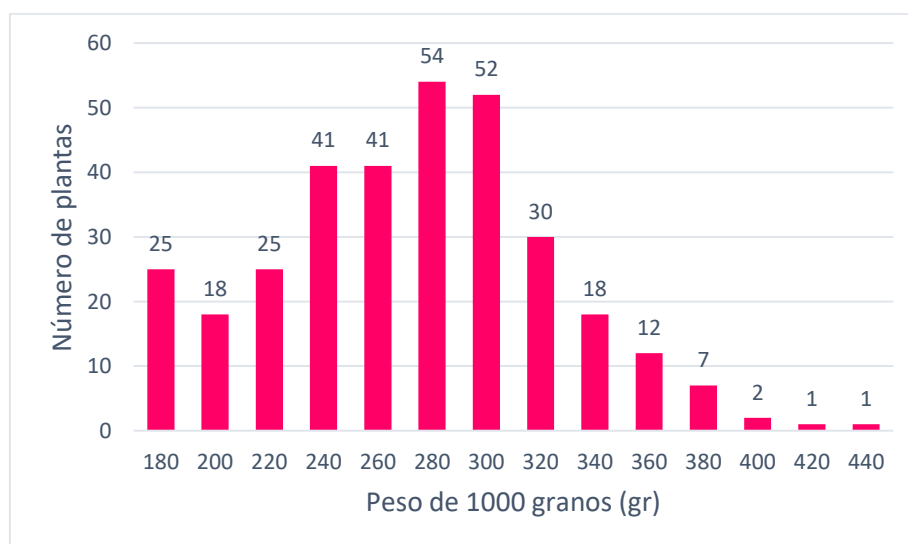


Figura 27. Peso de 1000 granos (gr) de los individuos evaluados en la población de maíces criollos.

Caracteres cualitativos

Se observó una elevada variabilidad en relación a los caracteres cualitativos evaluados: color del grano, forma de la espiga y disposición de las hileras en la mazorca. En cuanto al color del grano, se registraron 9 variantes: blanco, amarillo, morado, jaspeado, café, anaranjado, moteado, rojo, y púrpura, donde un 20 % lo conformaron granos morados, rojos y púrpuras. En la población progenitora los colores registrados fueron 13: incoloros, blancos, amarillos, morados, jaspeados, café, anaranjado, moteado, capa blanca, rojo, púrpura, marrón y crema. En cuanto a la forma del marlo, la predominante fue cónica, coincidiendo con lo registrado en la población original. Por último, la disposición de las hileras más representada fue la regular (82 %), seguida por irregular (12 %) y en espiral (6 %).

Evaluación de la respuesta a la selección

La Tabla 3 resume los promedios de cada una de las siete variables consideradas para realizar la evaluación de la respuesta a la selección.

Tabla 3. Valores promedios de las características estimadas en la población original (X_0), valores promedio de la siguiente generación (población evaluada en este trabajo) (X_1), y respuesta a la selección (R). Longitud de espiga: LE; diámetro de la espiga: DE; número de hileras por espiga: NHE; número de granos por hilera: NGH; número de granos por espiga: NGE; peso total de los granos: PTG; peso de 1000 granos: PMG.

Madres	LE (cm)	DE (mm)	NHE	NGH	NGE	PTG (gr)	PMG (gr)
\bar{X}_0	15,11	35,59	12,36	26,99	339,94	96,95	278,95
\bar{X}_1	15,97	36,75	11,74	31,22	366,91	83,90	260,55
R	0,86	1,16	-0,62	4,23	26,97	-13,05	-18,40
%	5,4	3,2	-5,3	13,5	7,4	-15,6	-7,1

Considerando que la respuesta a la selección se calcula como la diferencia entre el promedio de los individuos de la siguiente generación y la población original; la respuesta fue positiva solo en cuatro variables: longitud de la espiga, diámetro de la espiga, número de granos por hileras y número de granos por espiga, con porcentajes de 5,4 %, 3,2 %, 13,5 % y 7,4 % respectivamente (Tabla 4). Estos valores positivos no fueron considerados como suficientes para seleccionar genotipos superiores para la conformación de la siguiente generación, dado que se corre el riesgo de obtener resultados similares e incluso inferiores.

Dado que el peso junto al número de granos constituye los principales componentes del rendimiento, seleccionar genotipos superiores en base a estas variables, podría ser una estrategia en planes de mejoramiento donde el tiempo y los recursos son limitados para realizar la totalidad de determinaciones que se consideraron en este trabajo, sin embargo, en esta tesis sólo se obtuvo una diferencia positiva sólo en una de estas dos variables (número de granos) y, además, fue muy baja.

Estos resultados podrían deberse a las condiciones ambientales y de riego que se presentaron a lo largo del crecimiento y desarrollo del cultivo, dado que como se mencionó antes las escasas precipitaciones del periodo (225 mm) y la baja humedad relativa (44.1 %), podrían ser los factores más importantes causantes de estos resultados, como se mencionó anteriormente; el cultivo requiere entre 500 y 700 mm y 60 a 80 % de humedad relativa para poder desarrollarse, además, se registraron altas temperaturas máximas (34,5 °C) que superan el histórico de 32 °C, consecuentemente estas elevadas temperaturas pueden provocar el secado de las panojas. Al mismo tiempo, se sugiere aumentar el número de repeticiones a sembrar ya que, al tratarse de plantas alógamas que se reproducen por polinización cruzada, es necesario evitar la depresión por endogamia, fenómeno que suele darse en poblaciones pequeñas. Es importante mencionar que se perdió un 33 % de las plantas sembradas por mortandad y un 12 % mostraron bajo crecimiento (plantas bajas y poco desarrolladas), lo que podría también explicar, en parte, porque no se observó avance genético por selección.

Condiciones desfavorables y estresantes durante el cultivo pueden ocasionar un establecimiento de jerarquías de individuos (*i.e.* dominantes y dominados) temprano en el ciclo del cultivo (Maddonni y Otegui, 2044), donde las plantas dominadas exhiben un desarrollo de espiga retrasado y menor partición de biomasa a estructuras reproductivas (Pagano y Maddonni, 2007).

Análisis de espigas individuales

Con el fin de evaluar si se destacaban algunas espigas individualmente, se realizó un análisis de los promedios individuales. En este sentido, se observó que para las variables LE, DE, NGH y NGE, más del 50 % del total superaron el valor promedio de la población original (X_0) con porcentajes de 94 %, 62 %, 91 % y 71 %, respectivamente. Por otro lado, para el NHE, PTG y PMG, los porcentajes fueron 18 %, 18 % y 24 %, respectivamente. En la Tabla Suplementaria 1 del Anexo se presentan los datos de las espigas individuales que superaron al valor promedio de la población progenitora. Como observación, las espigas cosechadas con ID 439, 45, 448 y 279 se destacaron en seis de las siete variables consideradas, en cambio, la espiga número 25 se observó en todas las variables.

Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados, y considerando la selección previamente realizada en la población original; se evidenció avance genético en cuatro de siete de los caracteres evaluados. Sin embargo, estos resultados no fueron considerados significativos, dado que, en la mayoría de los casos, los porcentajes fueron bajos, por lo que seleccionar en esta población podría ser riesgoso. Esto podría atribuirse principalmente a las condiciones climáticas y técnicas desfavorables presentes durante el desarrollo del cultivo.

La población de maíces evaluada presentó una gran variabilidad fenotípica, en caracteres tanto cualitativos como cuantitativos, claves en la determinación del rendimiento. Esta gran variabilidad representa un valioso reservorio de diversidad que puede ser aprovechado en los programas de mejoramiento genético de maíz, para realizar combinaciones y mejorar características deseables. Este aspecto cobra mayor importancia cuando se quiebran las tolerancias naturales o artificiales como por ejemplo las relacionadas a herbicidas o la resistencia a insectos (tecnología Bt).

El carbón del maíz (*Ustilago maydis*) es una enfermedad que puede provocar mermas en el rendimiento al dañar las espigas. A pesar de ser una enfermedad bastante común, se observó una baja incidencia (2 %) en las espigas evaluadas, aunque fue un año seco con baja humedad para el desarrollo del hongo, se sugiere que estos genotipos poseen una baja susceptibilidad a esta enfermedad. Esta característica es una ventaja importante de los maíces criollos frente a los híbridos comerciales modernos, ya que generalmente son más susceptibles a enfermedades debido a su base genética más estrecha. La resistencia a enfermedades es un rasgo muy valioso en el mejoramiento genético, ya que permite reducir el uso de fungicidas y obtener cultivos más seguros desde el punto de vista ambiental y de la salud humana. Además, disminuye los costos de producción para los agricultores.

El alto porcentaje de plantas con granos morados, púrpuras o rojos (presencia de antocianinas) registrados en esta población, representa un recurso genético para planes de mejora enfocados en incorporar o incrementar el contenido de estos compuestos en maíz, ya sea para alimentación humana o como fuente de colorantes naturales. Cabe destacar que actualmente en nuestro país, estos pigmentos están siendo valorados por su color, olor y sabor en la gastronomía de restaurantes que incluyen en sus platos alimentos preparados con harina de maíz morado.

La conservación de la diversidad genética que poseen los materiales evaluados es muy valiosa ya que podrían ser útiles en programas de mejoramiento genético de maíz, tanto para los cultivos híbridos actuales como para variedades de polinización abierta enfocados en diferentes objetivos y preferencias; ya sea para alimentación humana o animal, o para

diferentes fines agronómicos, industriales o nutraceuticos. Al mismo tiempo, contribuye a mantener la identidad cultural y la soberanía alimentaria de las comunidades rurales.

Anexo

Tabla S1. Espigas cosechadas con su ID (número interno identificador) con cada una de las variables consideradas en la evaluación de la respuesta a la selección. La tabla presenta únicamente los valores de las espigas que superaron el valor promedio de la población original. Longitud de espiga: LE; diámetro de la espiga: DE; número de hileras por espiga: NHE; número de granos por hilera: NGH; número de granos por espiga: NGE; peso total de los granos: PTG y peso de 1000 granos: PMG.

Espigas cosechadas													
ID	LE (cm)	ID	DE (mm)	ID	NHE	ID	NGH	ID	NGE	ID	PTG (gr)	ID	PMG (gr)
115	15,12	45	41,38	45	13,50	39	32,80	39	363,80	45	120,20	45	283,62
26	15,20	26	36,43	274	12,56	45	33,36	45	458,36	25	102,34	25	289,62
316	15,24	135	36,28	25	12,64	115	28,22	26	385,40	341	105,85	341	280,80
116	15,28	274	36,67	272	12,55	26	32,40	316	386,78	279	106,18	279	311,17
135	15,42	25	40,67	439	12,55	316	33,67	135	365,90	328	119,84	328	300,24
274	15,48	341	36,30	448	13,31	116	27,90	25	377,55	439	102,06	268	280,78
25	15,70	279	36,50			135	33,30	289	374,44			448	294,75
289	15,71	136	37,18			25	29,91	341	431,11			443	298,69
341	15,79	229	37,89			289	35,11	279	373,50				
279	15,81	161	37,48			341	36,89	229	389,50				
136	15,90	328	37,65			279	35,20	161	420,00				
229	16,06	349	36,67			136	30,36	328	456,38				
161	16,11	268	36,25			229	32,25	272	446,91				
328	16,11	451	38,43			161	37,67	261	417,75				
272	16,28	366	36,35			328	38,13	238	383,27				
261	16,36	439	40,10			272	35,36	349	367,08				
238	16,42	371	42,22			261	34,00	170	346,00				
348	16,44	448	41,79			238	32,09	451	362,15				
349	16,52	443	37,62			349	29,75	366	346,78				
268	16,53	418	38,09			268	29,63	439	412,55				
170	16,66	393	36,95			170	29,80	371	401,20				
452	16,76					158	28,29	448	389,38				
158	17,10					451	30,77	418	346,77				
451	17,11					366	29,22	415	343,25				
366	17,12					439	32,64						
439	17,19					371	34,40						
371	17,20					448	28,85						
448	17,56					443	27,00						
443	17,74					418	30,62						
418	17,81					415	28,92						
415	17,89					393	30,67						
393	17,99												

Bibliografía

Abendroth, L. J., Elmore, R. W., Boyer, M. J., & Marlay, S. K. (2011). Corn Growth and Development. PMR 1009. Iowa State University Extension.

Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El maíz en Cuba. Cultivos tropicales, 30(2), 00-00.

Alvarez, D. M. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz.

Andrade, F. H., Cirilo, A. G., & Uhart, S. (2023). Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. MAIZAR, Asociación Maíz y Sorgo Argentino.

Barcelona, J. (2022). Estudio de la variabilidad genética en razas nativas de maíz (*Zea mays* L.) y su potencial para el mejoramiento del cultivo. Trabajo de intensificación para optar al grado de Ing. Agronómica, Universidad Nacional de Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Bertoia, N. P. (2021). Aspectos fisiológicos y agronómicos en la producción de maíz. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 47(3), 595-615.

Biasutti, C. A., Bongianino, N., & de la Torre, M. V. (2021). Nuevas variedades de maíz (*Zea mays* L.) para la zona semiárida de la provincia de Córdoba, Argentina. AgriScientia, 38(1), 141-150.

Bonnett, O. T. (1948). Ear and tassel development in maize. Annals of the Missouri Botanical Garden, 35(4), 269-287.

Brandolini, A. (1970). Maize. Maize.

Brouillard, R. (1982). Chemical structure of anthocyanins. Anthocyanins as food colors, 1, 1-38.

Callava Tiznado, S. (2020). Caracterización morfológica y selección de diferentes genotipos de maíz (*Zea mays* L.). Trabajo de intensificación para optar al grado de Ing. Agronómica, Universidad Nacional de Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Cámara Hernández J, Miente Alzogaray A (1997). Las razas de maíz de Jujuy y Salta, Argentina, pp. 19-23 in 1er. Taller Internacional de Recursos Fitogenéticos del Noroeste Argentino, Salta, Argentina.

Cámara Hernández, J., Miente Alzogaray, A.M., Bellon, R. and Galmarini A.J. (2011). Razas de maíz nativas de la Argentina. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 2011; 174 pp.

Cárcamo, M. I., García, M. M. M. I., Manzur, M. I., Montoro, Y., Pengue, W., Salgado, A., ... & Vélez, G. (2011). Biodiversidad, erosión y contaminación genética del maíz nativo en América Latina. Red por una América Latina Libre de Transgénicos. Mas Grafica, Santiago.

Cerrudo D., M. Hernández, M. Tollenaar, C.R.C. Vega y L. Echarte. (2020). Kernel number response to plant density in tropical, temperate, and tropical × temperate maize hybrids. *Crop Science* 60: 381-390.

Condón, F., & Rossi, C. (2018). Banco de germoplasma INIA: conservando la diversidad de nuestras plantas. *Rev. INIA*, 52, 52-55.

Corona-Mendoza, E., Martínez-Rueda, C. G., & Estrada-Campuzano, G. (2012). Determinantes del peso de grano en cultivares nativos e híbridos de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(8), 1479-1494.

Cubero, J.L. 2013. *Introducción a la Mejora Genética Vegetal*. 3ra edición. Ediciones MundiPrensa Madrid. España.

De la Cruz-Lázaro, D., Castañón-Nájera, G., Brito-Manzano, N. P., Gómez-Vázquez, A., Robledo-Torres, V., & Lozano del Río, A. J. (2010). Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Phyton (Buenos Aires)*, 79(1), 11-17.

De Pascual, T S., & Sanchez-Ballesta, M. T. (2008). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemistry reviews*, 7, 281-299.

De Tapia, E. M. (1997). La domesticación del Maíz. *Arqueología Mexicana*, 5, 34-39.

Dimitri, M. J., & Orfila, E. N. (1985). *Tratado de morfología y sistemática vegetal*.

Dowswell, C. D., Paliwal, R. L., & Cantrell, R. P. (1996). *Maize in the third world*. Boulder, CO, USA.

DuPont Pioneer. 2024. Disponible en https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Latin_America_Central/Chile/Servicios/Informacion_tecnica/Corn_Growth_and_Development_Spanish_Version.pdf

Egesel, C. O., Wong, J. C., Lambert, R. J., & Rocheford, T. R. (2003). Combining ability of maize inbreds for carotenoids and tocopherols. *Crop Science*, 43(3), 818-823.

Eyherabide (2006). Maíz y nutrición. Informe sobre los usos y las propiedades nutricionales del maíz para la alimentación humana y animal.

Eyherabide, G. H. (2006). Mejoramiento genético de maíz y su trayectoria en la Argentina. Serie de Informes Especiales de ILSI Argentina, Volumen II: Maíz y Nutrición, 14.

Eyhérabide, G. H. (2012). Mejoramiento genético de Maíz. Bases para el manejo del cultivo de maíz, 57-77.

Hernández, F. A., Amelong, y Borrás L. (2014). Genotypic differences among argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal* 106: 2316-2324.

IBPGR, 1991. Descriptors for Maize. International Maize and Wheat Improvement Center, Mexico City/International Board for Plant Genetic Resources, Rome.

Konczak, I., & Zhang, W. (2004). Anthocyanins—more than nature's colours. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2004(5), 239.

Lia, V. V. (2004). Diversidad genética y estructura poblacional en razas nativas de maíz (*Zea mays* ssp. *mays*) del Noroeste Argentino: presente y pasado del germoplasma autóctono (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

Maddonni, G.A. y Otegui, M.E. (2004). Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crops Research* 85: 1-13.

Malagrina, G. M. (2023). Banco base de germoplasma. Web

Martínez, O., Aramendis, H., & Torregroza, M. (1992). Selección masal divergente por prolificidad en maíz y sus efectos en las características de la espiga. *Agronomía Colombiana*, 9(1), 40-48.

Matsuoka, Y. (2005). Origin matters: Lessons from the search for the wild ancestor of maize. *Breeding Science*, 55(4), 383-390.

Melchiorre, P., Bartoloni, N., & Cámara Hernández, J. A. (2020). Relaciones fenotípicas y genéticas entre razas tardías de maíz (*Zea mays* ssp. *mays*) nativas de la provincia de Misiones (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 55(1), 1-20.

Miyazawa, T., Nakagawa, K., Kudo, M., Muraishi, K., & Someya, K. (1999). Direct intestinal absorption of red fruit anthocyanins, cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3, 5-diglucoside, into rats and humans. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(3), 1083-1091.

Montoro, R, A. E., & Ruiz, M. B. (2017). *Ecofisiología del cultivo de maíz dulce (Zea mays L. Var. Saccharata)= Echophysiology of sweet corn (Zea mays L. var. saccharata)*.

Oreamuno-Fonseca, P., & Monge-Pérez, J. E. (2018). Maíces nativos de Guanacaste, Costa Rica: caracterización de los granos. *Cuadernos de investigación UNED*, 10(2), 353-361.

Ortiz, E., Carballo, A. C., Orozco, A. M., & Cossío, F. V. G. (2010). Efecto de la dispersión de polen en la producción de semilla de maíz, en Texcoco, México. *Agronomía Mesoamericana*, 21(2), 289-297.

Ortíz, M. A., Vargas, M. D. C. R., Madinaveitia, R. G. C., & Velázquez, J. A. M. (2011). Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biocencia*, 13(2), 16-22.

Ortigoza Guerreño J., López Talavera, C.A., Villalba, J.D. (2019). Guía técnica cultivo de maíz.. FCA, UNA, Paraguay. Disponible en: https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_04.pdf

Pagano, E., Cela, S., Maddonni, G.A. y Otegui, M.E. (2007). Intra-specific competition in maize: Ear development, flowering dynamics and kernel set of early-established plant hierarchies. *Field Crops Research* 102: 198-209.

Paliwal, R. L. (2001). *El Maiz en Los Tropicos: Mejoramiento Y Produccion (Coleccion FAO: Produccion Y Proteccion Vegetal) (No. 28)*. Food & Agriculture Org.

Pecket, R. C., & Small, C. J. (1980). Occurrence, location and development of anthocyanoplasts. *Phytochemistry*, 19(12), 2571-2576.

Pengelly, J. J., Kwasny, S., Bala, S., Evans, J. R., Voznesenskaya, E. V., Koteyeva, N. K., ... & von Caemmerer, S. (2011). Functional analysis of corn husk photosynthesis. *Plant physiology*, 156(2), 503-513.

Pereyra, V. R., Luna, C. M., Funes, L. M., & Salerno, J. C. (2015). Genetic parameters for resistance to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and disease incidence in tropical maize. *Euphytica*, 202(1), 35-42.

Rivas, J. G. (2016). Caracterización de la diversidad genética de razas nativas de maíz (*Zea mays ssp mays*) del Noroeste Argentino mediante descriptores morfométricos y

marcadores moleculares (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

Rotili, D. H., Maddonni, G. A., & Abeledo, L. G. (2020). El cultivo de maíz en ambientes marginales: bases eco-fisiológicas y mecanismos de plasticidad asociados al macollaje (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires).

Sangoi, L., & Androcioli Filho, A. (2019). Effect of plant density on yield stability of maize hybrids adapted to subtropical regions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2(2), 255-264.

Saquimux Canastuj, F. I. (2011). Selección masal en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) para pequeños agricultores. Quetzaltenango, Guatemala: Comité Editorial ICTA. pagina web. Disponible en: Chrome extension: [//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Maiz/seleccion%20del%20maiz.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Maiz/seleccion%20del%20maiz.pdf).

Serratos, H. J. (2009). El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. Greenpeace. México, DF.

Shipp, J., & Abdel-Aal, E. S. M. (2010). Food applications and physiological effects of anthocyanins as functional food ingredients. *The open food science journal*, 4(1).

Tokatlidis, I. S., & Koutroubas, S. D. (2004). A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Research*, 88(2-3), 103-114.

Verduzco, C. V., Pérez, C. E., Sánchez, E. V., Castellanos, J. S., & Cabrera, I. S. (2020). Dynamics of Huitlacoche Harvest (*Ustilago maydis* Cda in nine commercial corn hybrids. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3).