

APTITUD PRODUCTIVA DE TRECE LÍNEAS ÉLITES DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.) EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL PATACAMAYA

Productive aptitude of thirteen elite lines of flour wheat (*Triticum aestivum* L.) at the Patacamaya Experimental Station

Rodrigo Grover Mamani Vargas¹, Medardo Wilfredo Blanco Villacorta²

RESUMEN

El trigo es el cereal más cultivado dentro del sistema agrícola con una producción estimada en 2022 de 794 millones de toneladas y en nuestro país se constituye la principal fuente de alimento con un rendimiento que oscila en 1.1 t ha⁻¹ en los últimos diez años (2013-2022). El presente estudio tiene como objetivo identificar líneas éliticas con características agronómicas sobresalientes para el componente de rendimiento bajo condiciones agro meteorológicas del Altiplano Central de Bolivia, identificar correlaciones entre variables agronómicas, fenológicas, fisiológicas de rendimiento y calidad en las trece líneas éliticas de trigo harinero. Para el presente trabajo se evaluaron trece líneas éliticas y dos testigos (Tepoca-T89 y INIAF-Totora-2014) donde se instaló bajo el diseño de bloques completamente al azar. Los genotipos fueron sembradas con una densidad de siembra de 120 kg ha⁻¹, con una fertilización de 87.452 kg ha⁻¹ de 46-00-00 y 45.999 kg ha⁻¹ de 18-46-00, para el control de malezas de hoja ancha se aplicó herbicida metsulfuron-metil en tres dosis de 8-9-10 g ha⁻¹ y riegos de acuerdo a la necesidad del cultivo. Las evaluaciones de las variables registradas fueron: fenológicas, agronómicas, fisiológicas, rendimiento y calidad acorde a las fases fenológicas del cultivo. Para analizar e interpretar los datos se realizó análisis estadístico descriptivo, varianzas, prueba de medias, multivariado, componentes principales, ranking de rendimiento. En conclusión, para estas características destacan los genotipos L-13, Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014 con rendimientos de: 2 374, 2 066, 1 969 kg ha⁻¹ como los más promisorios. Por lo tanto, es posible cultivar el trigo tomando medidas de prevención y adaptación para garantizar la viabilidad de producción en esta región del Altiplano Central de Bolivia.

Palabras clave: aptitud, correlación, *Triticum aestivum* L., altiplano, rendimiento, Biplot.

ABSTRACT

Wheat is the most cultivated cereal within the agricultural system with an estimated production in 2022 of 794 million tons and in our country it is the main source of food with a yield ranging from 1.1 t ha⁻¹ in the last ten years (2013-2022). The present study aims to identify elite lines with outstanding agronomic characteristics for the yield component under agro-meteorological conditions of the Central Highlands of Bolivia, and to identify correlations between agronomic, phenological, physiological, yield and quality variables in the thirteen elite lines of flour wheat. Thirteen elite lines and two controls (Tepoca-T89 and INIAF-Totora-2014) were evaluated under a completely randomized block design. The genotypes were sown with a sowing density of 120 kg ha⁻¹, with a fertilization of 87,452 kg ha⁻¹ of 46-00-00 and 45.999 kg ha⁻¹ of 18-46-00, for broadleaf weed control herbicide metsulfuron-methyl was applied in three doses of 8-9-10 g ha⁻¹ and irrigations according to the need of the crop. The variables recorded were: phenological, agronomic, physiological, yield and quality according to the phenological stages of the crop. To analyse and interpret the data, descriptive statistical analysis, variance, mean test, multivariate, principal components, yield ranking were carried out. In conclusion, for these characteristics the genotypes L-13, Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014 with yields of: 2 374, 2 066, 1 969 kg ha⁻¹ stand out as the most promising. Therefore, it is possible to grow wheat by taking preventive and adaptive measures to ensure the viability of production in this region of the Central Highlands of Bolivia.

Keywords: aptitude, correlation, *Triticum aestivum* L., altiplano, yield, Biplot.

¹ Estación Experimental Patacamaya, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7208-7428>. rgmamani11@umsa.bo

² Docente Investigador, Estación Experimental Patacamaya, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9266-9972>. mwblanco1@umsa.bo

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es el cereal más cultivado en el mundo y el alimento más importante dentro del sistema agrícola, prácticamente es un cultivo de clima templado; pero debido a su diversidad genética llegó a adaptarse casi a todas las presiones atmosféricas del mundo. Donley (2023) menciona que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estimó la producción de trigo en el año 2022 en 794 millones de toneladas a nivel mundial. Molina y Gutiérrez (2021) afirman que en Bolivia se constituye la principal fuente de alimento por su fuente de energía. El Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023) describe que en los últimos diez años en Bolivia (2013-2022) el rendimiento de trigo promedio fue 1.1 t ha⁻¹.

Considerando los problemas del Altiplano Central del departamento de La Paz que presenta condiciones adversas y una serie de factores naturales que limita la agricultura, debido al clima y déficit hídrico durante la mayor parte del año y en ocasiones con presencia de heladas y granizo, los suelos son deficientes en sus propiedades físicas, químicas y biológicas se traducen en baja fertilidad. El trigo se cultiva poco en estas regiones, con un rendimiento promedio de 0.7 t ha⁻¹ para los últimos diez años (2013-2022) en el departamento de La Paz (INE, 2023). Por tal motivo la

reacción de estos genotipos a las condiciones adversas es considerada de vital importancia.

Frente a este panorama, el presente trabajo buscó identificar líneas élites con características agronómicas sobresalientes para el componente de rendimiento bajo condiciones agro meteorológicas del Altiplano Central de Bolivia, identificar correlaciones entre variables agronómicas, fenológicas, fisiológicas de rendimiento y calidad en las trece líneas élites de trigo harinero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en la campaña agrícola 2022-2023 en la Estación Experimental Patacamaya, perteneciente a la Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, ubicada en la provincia Aroma, municipio de Patacamaya (Bolivia) a 104 km de la sede de gobierno a 17° 55' 48" de latitud sur y 67° 57' 56" de longitud oeste, con una altitud de 3 787 m s.n.m.

Metodología

Se utilizó trece líneas élites y dos testigos (Tepoca-T89 y INIAF-Totora-2014) perteneciente al PN-Trigo (INIAF) (Tabla 1).

Tabla 1. Historial de selección de 13 líneas élites de trigo harinero.

n	Líneas	Cruza	Historial de selección	Origen
1	Tepoca-T89			PROTRIGO
2	INIAF-Totora-2014			INIAF
3	L3	KENYA SUNBIRD/2*KACHU	CMSS08B00771T-099TOPY-099	1 SBEGT
4	L4	KIRITATI/HUW234+LR34/PRINIA	CMSS08B00737T-099TOPY-099	1 SBEGT
5	L5	KACHU#	CMSS97M03912T-040Y-020Y-03	1 SBEGT
6	L6	SUP152/3/TRCH/SRTU//KACHU	CMSS10Y00052S-099Y-099M-09	1 SBEGT
7	L7	KSW/SAUAL//SAUAL/3/BORL14	CMSS11B00123S-099M-099NJ-0	1 SBEGT
8	L8	DBW 88		2WBEG
9	L9	MILAN//SRMA/TUI/3/PRL/2*PAST	CMSA02Y00697T-040M-040PDY	2WBEG
10	L10	WAXWING/KIRITATI//KACHU	CMSS05800461S-099Y-099M-09	2WBEG
11	L11	UP2338*2/KKTS*2//YANAC*2/3W	CMSS11Y01139T-099TOPM-099	9 HLBSN
12	L12	KACHU/SAUAL*2//COPIO	CMSS11Y00827T-099TOPM-099	50 IBWSN
13	L13	KFA/5REH/HARE//2*BCN/3/CRO	CMSS11Y01221T-099TOPM-099	50 IBWSN
14	L14	SAUAL/MUTUS/3/ATTILA*2/PBW	CMSS11B00651T-099TOPY-099	50 IBWSN
15	L15	NADI/COPIO//NADI	CMSS11B00910T-099TOPY-099	50 IBWSN

n: 1, 2 Testigos; PROTRIGO: Proyecto Trigo; INIAF = Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal; 1 SBEGT y 9HLBSN = Helminthosporium leaf blights Screening Nursery; 50 IBWSN = International Bread Wheat Screening Nursery; 2 WBEG y 1 SBEGT = Wheat Blast Elite Germplasm.

La densidad de siembra fue de 120 kg ha⁻¹, El déficit de fertilización de 150.023 kg ha⁻¹ se aplicó 87.452 kg ha⁻¹ de 46-00-00 y 45.999 kg ha⁻¹ de 18-46-00. Para malezas de hojas anchas se controlaron con

herbicida a base del metsulfuron-metil en tres dosis de 8-9-10 g ha⁻¹. Los riegos se dieron acorde a la necesidad del cultivo en base al balance hídrico durante 92.2 min en fechas de cero precipitaciones.

El presente estudio se instaló bajo el diseño de bloques completamente al azar, que se distribuyeron aleatoriamente, formado por tres bloques, 13 líneas éliticas de trigo harinero y dos testigos como tratamientos con un total de 45 unidades experimentales, para efectos de bloquear los gradientes de variación que se generan en el área de estudio se dispusieron surcos de 4 m de ancho y 0.25 m entre surcos en cada unidad experimental. Los datos evaluados se introdujeron al programa estadístico R para obtener resultados significativos de todas las variables recolectadas durante la investigación.

Las variables registradas fueron: a) fenológicas; días a la emergencia (DE), conformados para cada línea de trigo desde la siembra por observación diaria cuando las plantas alcanzaron a emerger el 50 % de las semillas sembradas; días a espigamiento (DESP1), establecidos para cada línea de trigo desde el día que alcanzo el 50 % de espigamiento en la etapa de desembuchado o estado de bota; días a la floración (DF), fueron conformados cuando el 50 % de las plantas alcanzaron la fase de antesis (floración), la operacionalización fue de manera visual; días a la maduración (DM1) fueron establecidos para cada línea de trigo, cuando más del 50 % de las plantas en cada unidad experimental alcanzaron la fase cariósida con coloración amarillo oro, como indicador *in situ*, b) agronómicas; altura de planta (AP), se determinó para cada línea midiendo desde la base del tallo hasta la parte inferior de la espiga, excluyendo las aristas y la misma espiga, al alcanzar la madurez fisiológica; longitud de espiga (LE), se realizó la medida en centímetros con un vernier todas las espigas muestreadas desde el punto de inserción a la punta de la espiga excluyendo la arista en la fase de maduración; longitud de arista (LA), fue determinada para las diferentes líneas de trigo midiendo la estructura de la arista en la parte media de la espiga en centímetros, con un vernier en la fase de llenado de grano, c) fisiológicas: área foliar (AF), determinada en cm^2 con un vernier mediante el producto de las medidas ancho por largo por un factor de corrección de 0.81 de al menos cinco hojas banderas muestreadas en cada unidad experimental antes del espigamiento (antesis completa); área de grano (AG), fue determinada en el laboratorio para ello se empleó un instrumento de medición scanner analizador de semilla para medir en mm^2 , sin discriminación alguno de grano después de la etapa de trillado y venteado; rendimiento, número de plantas por metro lineal (NPML) se realizó el conteo de plantas por metro lineal

en (m) con un flexómetro en la finalización de la emergencia y antes que macollen, aproximadamente a los 30-40 días; número de plantas por metro cuadrado (NPM), se determinó mediante el producto del conteo de plantas en surcos centrales en un metro lineal por el número de surcos de cada unidad experimental, el valor obtenido fue expresado en metro cuadrado; número de espiguillas por espiga (NEE), se contabilizó a partir del tallo principal de la espiga, cuando alcanzó la madurez fisiológica; número de espigas por metro cuadrado (NEM), se realizó el conteo de las espigas en un metro cuadrado al centro de la unidad experimental, cuando las espigas alcanzaron completamente en más del 50 % de madurez fisiológica; número de granos por espiga (NGE), se determinó el conteo de todos los granos de cada espiga muestreada, cuando logró la madurez fisiológica; peso de mil granos (PMG), se determinó en el laboratorio después de la cosecha y trillado, la medida en gramos de cada unidad experimental mediante un scanner analizador de semilla; rendimiento final del cultivo (RDTO), después de la cosecha, trillado, venteado y liberado de toda impureza del grano, se obtuvo el peso con una balanza analítica en gramos posteriormente estas fueron transformadas a kg ha^{-1} , y d) calidad física; peso hectolítrico (PH), se determinó a partir de un scanner analizador de semilla, un tablero de semillas y balanza de peso, posteriormente el valor obtenido se introdujo al programa del scanner que transformó los valores obtenidos a peso hectolítrico registrados en Excel, obteniendo resultados en kg hl^{-1} .

Para el análisis de los datos cuantitativos obtenidos en estudio se realizó un análisis estadístico descriptivo (considerando el análisis de tendencia central, dispersión, y distribución), análisis de varianzas (para analizar la variación total de los resultados experimentales), prueba de medias (para medir diferencias específicas), análisis multivariado (para identificar el grado de asociación entre variables), análisis de componentes principales (para identificar patrones y relaciones de un conjunto de datos en términos de variable), ranking de rendimiento (para identificar líneas éliticas con mayor rendimiento).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico descriptivo

En la Tabla 2 se presenta datos estadísticos descriptivos de características cuantitativas evaluadas en 13 líneas éliticas de trigo harinero, estas variables se encuentran dentro de los parámetros de normalidad en cuanto a las medidas de distribución (asimetría y

kurtosis), por lo que los criterios son satisfechos y sugiere un análisis inferencial excepto estas variables (días a emergencia, días a floración, días a la madurez, días a espigamiento y número de espigas por metro cuadrado) lo cual sugieren que estuvieron fuera de los parámetros de normalidad ± 1 debida a las condiciones extremas del lugar para estas variables por lo que los criterios no son satisfechos y se sugiere un análisis de prueba no paramétrica. En relación al rendimiento la

media alcanzada fue $1564.83 \text{ kg ha}^{-1}$, con una desviación estándar de ± 473.14 presentando un máximo de 2540.60 y mínimo de $787.06 \text{ kg ha}^{-1}$, mostrando variabilidad entre las líneas élites de trigo harinero a causa de factores naturales como el clima, déficit hídrico, presencia de heladas, granizada y suelo deficiente en sus características físicas, químicas y biológicas.

Tabla 2. Estadística descriptiva de 13 líneas élites de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Variable	Media	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Mínimo	Máximo	Mediana	Asimetría	Kurtosis
AP	56.32	6.59	42.52	11.71	42.80	71.20	56.40	0.24	-0.47
LE	8.77	0.99	0.96	11.28	7.08	11.00	8.52	0.58	-0.31
LA	6.27	0.81	0.64	12.93	4.44	8.06	6.24	0.25	-0.17
DE1	15.69	4.54	20.17	28.95	7.00	21.00	17.00	-0.54	-1.00
DESP1	94.27	7.08	49.00	7.51	77.00	101.00	97.00	-1.12	0.26
DF	113.27	7.08	49.00	6.25	96.00	120.00	116.00	-1.12	0.26
DM1	142.84	16.25	258.09	11.37	114.00	162.00	143.00	-0.16	-1.47
AF	10.68	3.48	11.81	32.54	4.87	19.73	10.28	0.58	-0.02
AG	13.86	0.64	0.39	4.58	12.80	15.60	13.90	0.41	-0.06
NPML	28.89	6.90	46.54	23.88	17.00	44.00	29.00	0.35	-0.57
NPM	115.56	27.60	744.69	23.88	68.00	176.00	116.00	0.35	-0.57
NEE	13.64	1.33	1.74	9.78	11.00	17.00	14.00	0.28	-0.16
NEM	272.67	64.92	4120.53	23.81	173.00	395.00	264.00	0.37	-1.02
NGE	39.87	7.34	52.65	18.41	20.00	54.00	40.00	-0.35	-0.09
PMG	25.56	3.85	14.49	15.06	20.50	34.90	24.60	0.83	-0.09
RDTO	1564.83	473.14	218891.33	30.00	787.06	2540.60	1518.82	0.28	-0.75
PH	59.20	4.43	19.17	7.48	51.30	71.10	59.20	0.56	0.18

DE1 = días a emergencia (días); NPM = número de plantas por metro cuadrado (unidades); NPML = número de plantas por metro lineal (unidades); DF = días a floración (días); AP = altura de planta (cm); AF = área foliar (cm²); NEM = número de espigas por metro cuadrado (unidades); LE = longitud de espigas (cm); DESP1 = días a espigamiento (días); NEE = número de espiguillas por espiga (Unidades); NGE = número de granos por espiga (unidades); LA = longitud de la arista (cm); DM1 = días a la madurez (días); PMG = peso de mil granos (g); PH = peso hectolítrico (kg hl⁻¹); AG = área de grano (cm²); RDTO = rendimiento (kg ha⁻¹).

Análisis de varianza

En general, los resultados en la Tabla 3 muestran que no hubo diferencias significativas entre los diferentes bloques, en las variables DE1, DESP1, DF, NEM, NPM, NPML, NGE, DM1, AG y PH. Sin embargo, hubo siete excepciones notables; AP, AF, LE, NEE, LA, PMG, RDTO, que mostraron diferencias significativas y altamente significativas entre los bloques. Esto indica que los gradientes de variación relacionados con la ubicación o el manejo de cada bloque tuvieron un impacto en estas siete variables. En relación con los tratamientos, los resultados indican que tuvieron un efecto en la producción de trigo, sin embargo, para

comprender mejor estas diferencias, se lleva a cabo una prueba de promedios que determina el material genético que posee un impacto más positivo o negativo en la productividad a comparación con otros. El coeficiente de variación osciló entre un 3.7 y 29.14 %, esto indica que los resultados son consistentes y confiables. Además, los tratamientos mostraron un efecto significativo en las variables de estudio a excepción de las variables PMG, DE1, PH, que revela que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Los coeficientes de determinación oscilan de 36 al 79.0 % de variabilidad que es explicada por los tratamientos y el resto se desconoce por factores ambientales que no se explican en el modelo.

Tabla 3. Análisis de varianza de 13 líneas éliticas de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio										
		AP	LE	LA	AF	AG	NPML	NPM	NEE	NGE	RDTO	PH
Bloques	2	94.2*	0.02*	3.9**	137.1**	0.3 ^{ns}	54.3 ^{ns}	868.6 ^{ns}	6.7**	7.3 ^{ns}	881 658.5**	59.5 ^{ns}
Tratamientos	14	77.2**	000.25*	0.9**	9.3*	0.7*	82.9**	1 326.2**	2.4*	92.7*	432 380.2**	16.1 ^{ns}
EE	28	23.0	000.12	0.3	4.6	0.3	29.5	471.7	1.1	37.8	72 623.91	18.5
CV (%)		8.5	3.7	8.3	19.9	3.7	18.8	18.8	7.8	15.4	17.2	7.3
R ² (%)		66.0	66.0	74.0	76.0	58.0	61.0	61.0	60.0	55.0	79.0	40.0

CV% = coeficiente de variación; EE = error experimental; ** = significancia estadística al 1 % de probabilidad; * = significancia estadística al 5 % de probabilidad; ns = no significativo; R²% = coeficiente de determinación; NPM = número de plantas por metro cuadrado (unidades); NPML = número de plantas por metro lineal (unidades); AP = altura de planta (cm); AF = área foliar (cm²); AG = área de grano (cm²); LE = longitud de espigas (cm); NGE = número de granos por espiga (unidades); LA = longitud de la arista (cm); PH = peso hectolítrico (kg hl); AG = área de grano (cm²); RDTO = rendimiento (kg ha⁻¹).

Prueba de medias

Variables de rendimiento

Número de plantas por metro cuadrado: se observa cuatro grupos, la línea L-12 alcanzó un mayor número de plantas m⁻² con 169.3 unidades mostrando superioridad sobre las demás seguido de L-6 con 138.7 unidades de plantas m⁻² y el tercer grupo (C) con 138.7 unidades de plantas m⁻² y el tercer grupo (C) con

menor número de plantas m⁻² para los genotipos L-3, L-7, INIAF-Totora-2014 con 86.7, 86.7, 94.7 plantas m⁻² para el cuarto grupo (BC) las líneas L-13, L-15, L-5, L-10, Tepoca-T89, L-4, L-14, L-8, L-9, L-11 oscilan entre 128 a 105.3 plantas m⁻² (Figura 1). Kosina et al. (2013) citado por Yapu (2014) señalan que lo óptimo requerido es de 170 a 220 plantas m⁻². Nuestros resultados se encuentran dentro de los rangos y son consistentes.

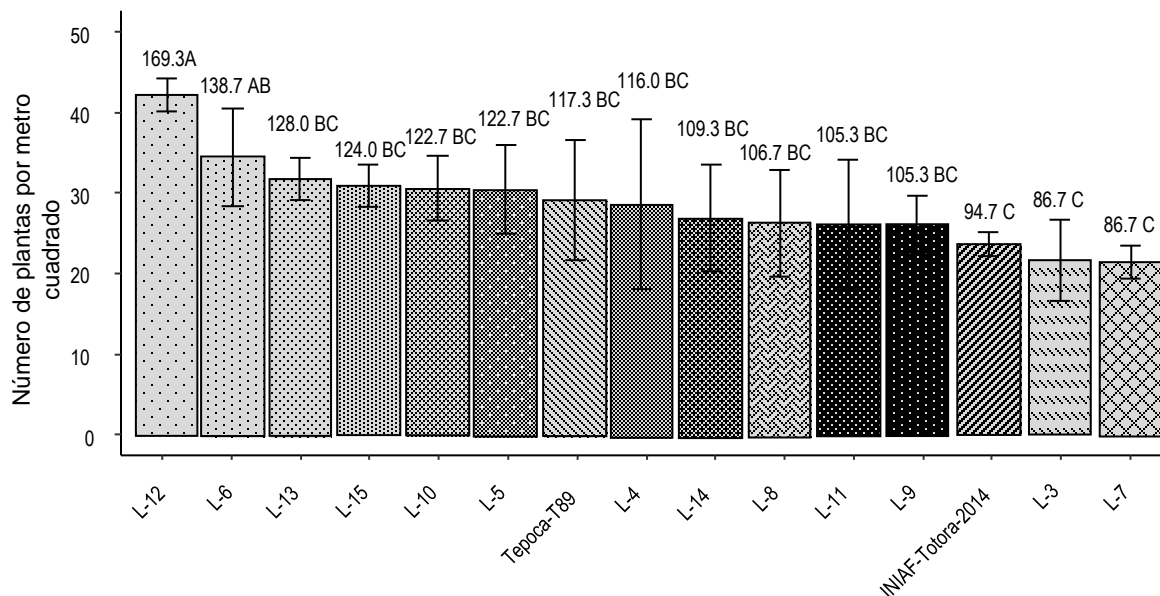


Figura 1. Prueba de promedios Duncan para número de plantas por metro cuadrado de 13 líneas éliticas de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Peso de mil granos: existen diferencias significativas en las comparaciones múltiples utilizando el método LSD donde se puede observar tres agrupaciones el primero (A), está conformada por las líneas L-10 y L-11 con promedios de 29.5 a 29.0 g de peso de mil granos y haciendo referencia al peso más bajo a la línea L-4 con 22.9 g de peso de mil granos y el segundo grupo (AB) como intermedio con valores de 27.9 a 23.4 g de peso de mil granos lo que significa que estadísticamente hay diferencias entre las 13 líneas,

con una diferencia numérica de 6.66 g, esto se debe a los eventos atípicos en la etapa de formación de grano por lo tanto el daño inhibió su desarrollo de manera regular (Figura 2). Zhang et al. (2023) describen que las bajas temperaturas llevan a una disminución en la tasa de llenado de grano con menor contenido de almidón que deprimen el peso del grano. Nuestros hallazgos son leves con los resultados de Sher et al. (2010) y Thungo et al. (2020) sobre el peso de mil granos por estrés por sequía.

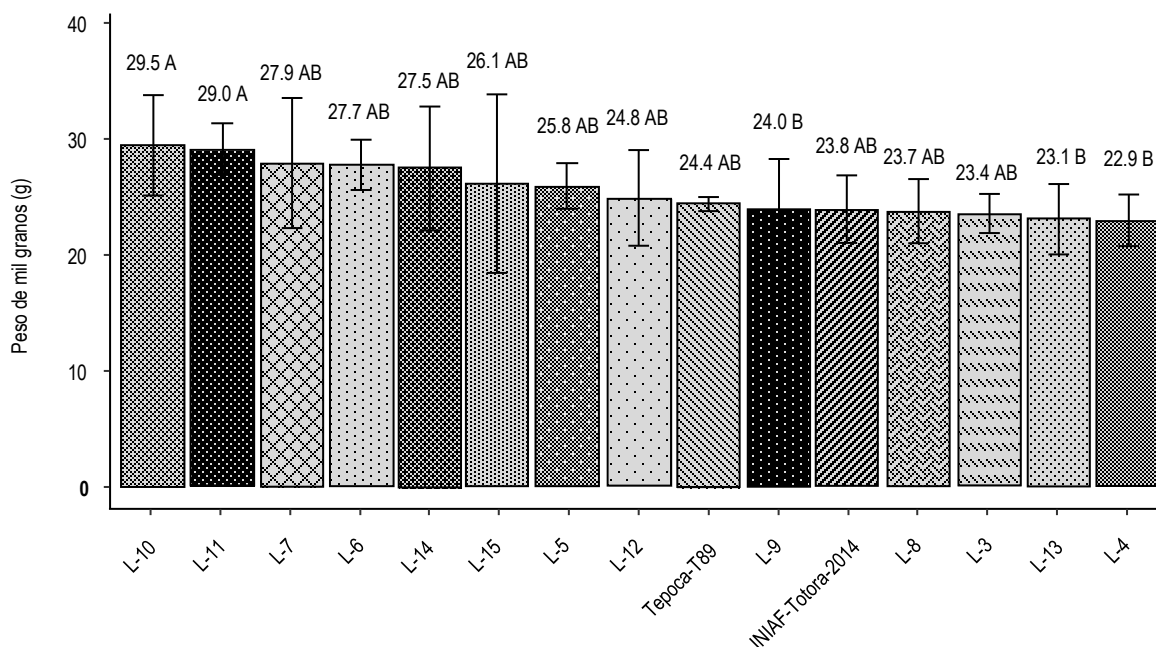


Figura 2. Análisis comparativo Friedman para el peso de mil granos de 13 líneas élites de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Rendimiento: muestra resultados conformando 11 grupos, en el primer grupo (A) la línea L-13 con 2 374 kg ha⁻¹ pudiéndose notar que corresponde al rendimiento más alto seguido del segundo (AB), tercero (ABC), cuarto (ABCD), quinto (BCDE) y sexto (CDEF) grupo conformado por Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014, L-14, L-15, L-5 con 2 066 a 1 557 kg ha⁻¹ con rendimientos intermedios seguido del séptimo grupo (CDEFG) que conforma las líneas L-11, L-7 con rendimientos de 1 495 a 1 473 kg ha⁻¹, respectivamente

los grupos octavo (DEFG) a décimo primero (G) que conforman las líneas L-3, L-12, L-6, L-9, L-10, L-4, L-8 con resultados de 1 445 a 991 kg ha⁻¹ haciendo referencia a los rendimientos bajos (Figura 3). Asimismo, Senbeta y Worku (2023) describen que los ensayos de adaptación en múltiples ubicaciones utilizando variedades de secano y germoplasma de trigo introducido se podrían obtener un rendimiento de grano de trigo superior a 6 000 kg ha⁻¹.

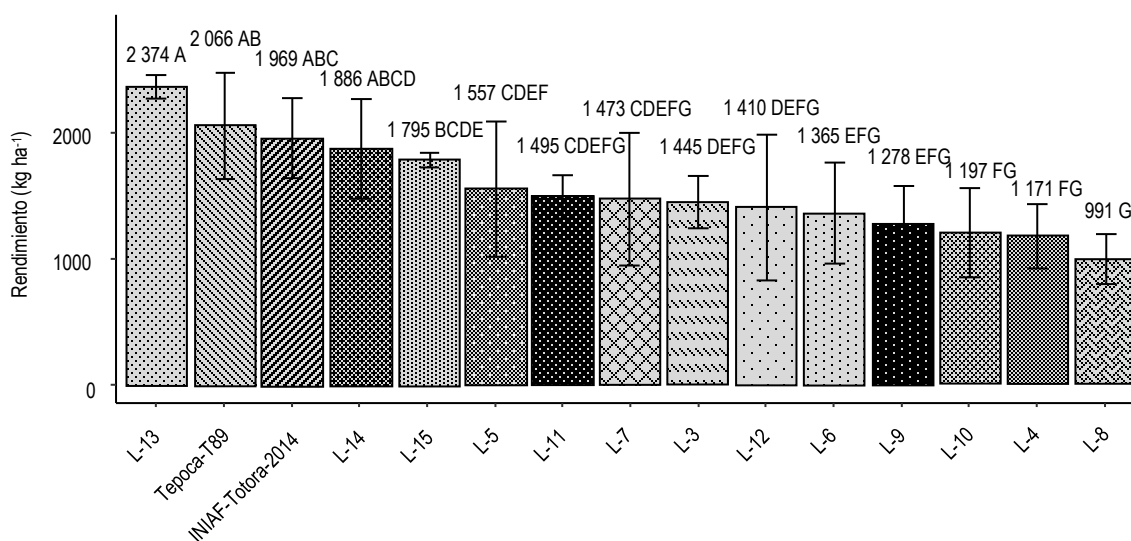


Figura 3. Prueba de promedios Duncan para el rendimiento de 13 líneas élites de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Variable de calidad física: peso hectolítrico

Se identifica un grupo (A) que estadísticamente son iguales entre tratamientos y numéricamente diferentes, en ese sentido se tiene los genotipos L-10, L-11, L-6, L-7, L-9, Tepoca-T89, L-5, L-15, INIAF-Totora-2014, L-8, L-3, L-13, L-14, L-12, L-4 con 62.7 a 55.3 kg hl⁻¹ donde la línea L-10 presenta 62.7 kg hl⁻¹ con una

diferencia numérica de 7.4 kg hl⁻¹ respectivamente (Figura 4). Asimismo, Zambrano (1986) describe que los valores comprendidos entre 76.0 y 79.0 kg hl⁻¹ están dentro de las exigencias de comercialización de trigo, valores menores a 68 Kg hl⁻¹ quedan de libre convenio. Lo anterior es similar a lo reportado por (Vergara-Díaz et al., 2015).

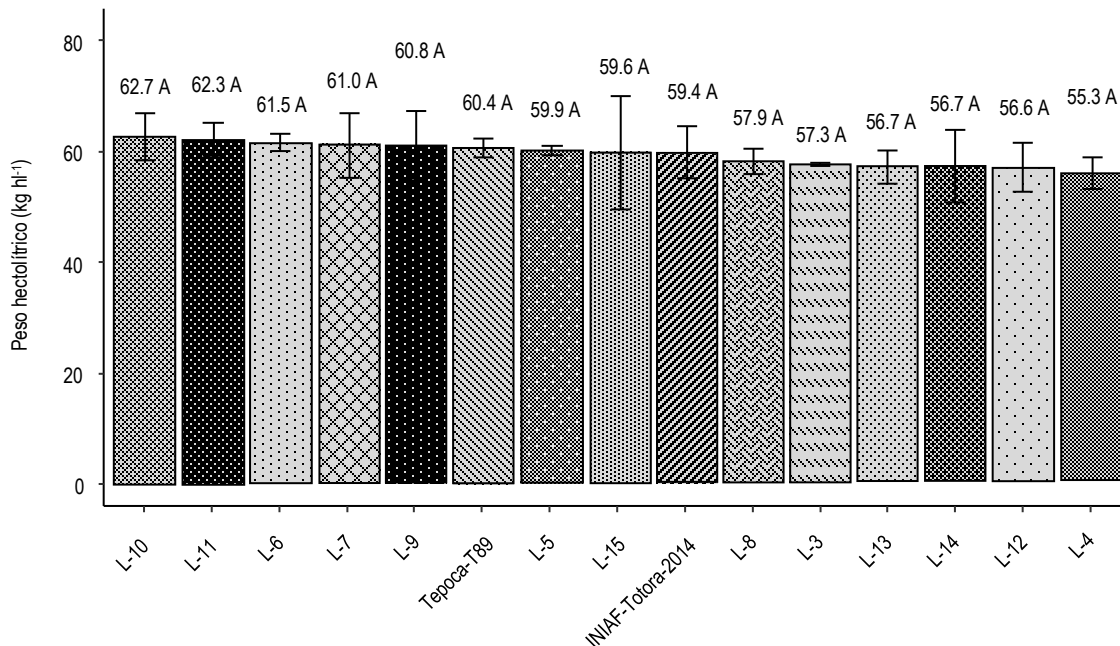


Figura 4. Prueba de promedios Duncan para el peso hectolítrico en 13 líneas éliticas de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Análisis multivariado

Se observa una correlación múltiple entre cada par (Figura 5), Donley (2023) menciona que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) consideró que los coeficientes de 0.4 indican un grado de asociación aceptable, de esta forma las correlaciones más importantes que influyen en la productividad fueron las variables fenológicas, agronómicas, fisiológicas, rendimiento en grano y calidad física.

Entre las variables fenológicas, la correlación corresponde a días a la maduración con días a floración ($r= 0.43$) expresa que cuando las plantas de trigo tardan más en florecer también tardan en alcanzar la madurez, días a espigamiento, ($r= 0.43$) indica que cuando tarda más en llegar a la fase de espigamiento se atrasa en llegar a la madurez y la asociación negativa con peso de mil granos ($r= -0.52$) revela que cuando tardan más en madurar, los granos tienden a ser más livianos. Otra correlación alta destaca días a

espigamiento con días a floración ($r= 1$), indica que cuando el trigo florece temprano, también tiende a espigar más temprano, esto debido a condiciones genéticas de las líneas éliticas de trigo harinero. La variable fisiológica destaca en relación al rendimiento área foliar con longitud de espiga, ($r= 0.42$) esto indica que a mayor área foliar se traduce a desarrollar espigas más largas.

La correlación con el rendimiento en grano destaca: altura de planta ($r= 0.41$), número de espigas por metro cuadrado ($r= 0.55$), número de espiguillas por espiga ($r= 0.39$), número de granos por espiga ($r= 0.48$), los valores positivos indican que al aumentar su coeficiente se traducirá en el incremento del rendimiento en grano. Seguidamente, destaca la variable de calidad física en correlación negativa y positiva entre el peso hectolítrico con días a la maduración ($r= -0.44$), altura de planta ($r= -0.39$) y peso de mil granos ($r= 0.82$) las asociaciones negativas indican que su formación induce a tener granos chupados o arrugados y el peso hectolítrico sea más bajo.

Butrón et al. (2016) obtuvieron resultados de variables agronómicas, encontrando que la correlación más alta correspondió a altura de planta con número de espigas por metro cuadrado, longitud de espiga, número de granos por espiga, peso de mil granos y rendimiento con $r = 0.536$, $r = 0.382$, $r = 0.380$, $r = 0.519$ y 0.814 $r = 0.345$ respectivamente. Las correlaciones positivas de altura de planta, número de espigas por

metro cuadrado, longitud de espiga, número de granos por espiga, peso de mil granos, peso hectolítrico con el rendimiento con $r = 0.814$, $r = 0.536$, $r = 0.382$, $r = 0.380$, $r = 0.519$, $r = 0.814$ y $r = 0.345$, estos coeficientes altos y significativos indican que al aumentar las variables mencionadas se traducirá en el incremento del rendimiento en grano.

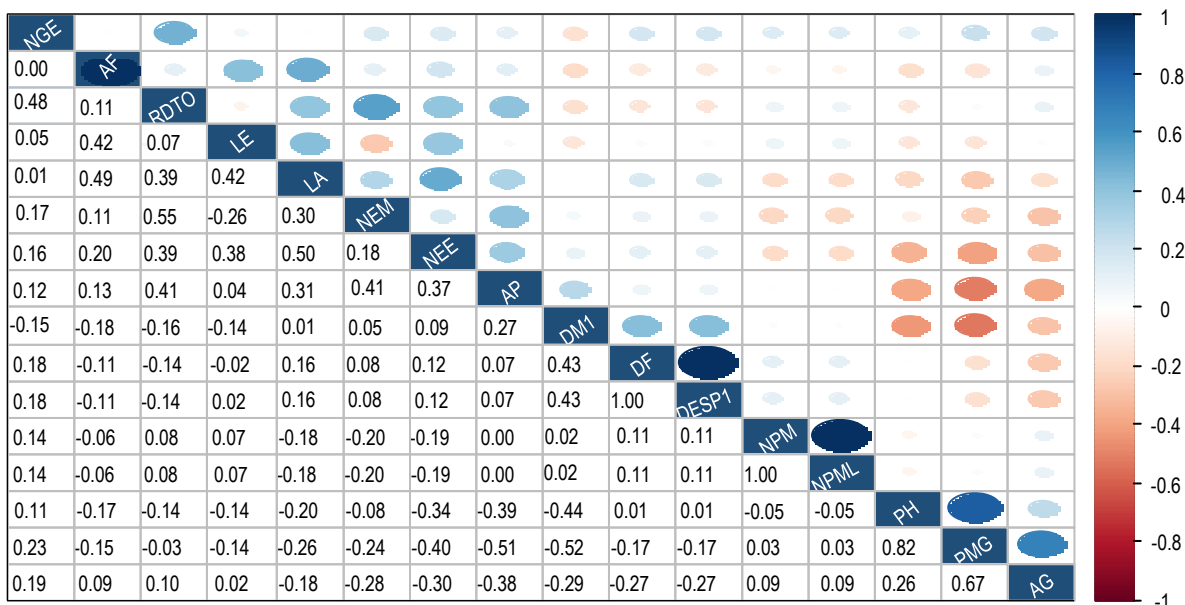


Figura 5. Matriz de coeficiente de correlación múltiple para la aptitud productiva de 13 líneas elites de trigo harinero entre las variables NPM = número de plantas por metro cuadrado; NM = número de macollos; NPML = número de plantas por metro lineal; DF = días a floración; AP = altura de planta; AF = área foliar; NEM = número de espigas por metro cuadrado; LE = longitud de espigas; DESP1 = días a espigamiento; NEE = número de espiguillas por espiga; NGE = número de granos por espiga; LA = longitud de la arista; DM1 = días a la madurez; PMG = peso de mil granos; PH = peso hectolítrico; AG = área de grano; RDTO = rendimiento, evaluados durante la gestión agrícola 2022-2023. El color de las esferas indica la intensidad de la correlación entre dos variables.

Análisis de componentes principales

En los resultados se presentan en la Figura 6, de sedimentación de los componentes en orden descendente, los dos primeros componentes indican valores de 32.4 a 18.4 % que son los más importantes de la varianza total explicada, dado que estos valores me representan un porcentaje del 50.8 % de la

varianza total. Quispe et al. (sf) indica que el gráfico de sedimentación de componentes principales confirma que después de dos componentes, la ganancia de información disminuye notablemente lo que significa que del tercer al décimo componente la contribución de cada variable a la formación de los componentes principales es insignificante (Figura 6).

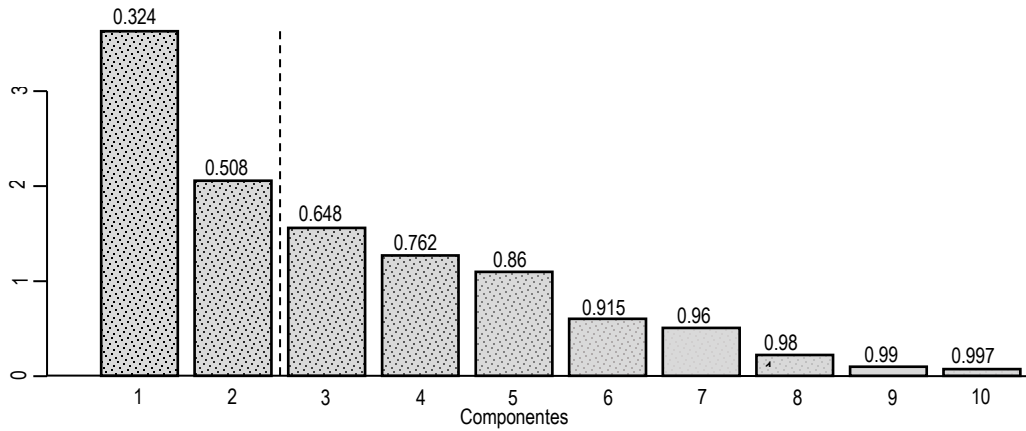


Figura 6. Gráfico de sedimentación de los componentes principales de acuerdo a varianza acumulada en el estudio para la aptitud productiva de 13 líneas élités de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

En el Biplot de la Figura 7 se puede observar variables altamente correlacionadas como el rendimiento, número de espigas por metro cuadrado, altura de planta y número de granos por espiga, que conforman un grupo relacionado a productividad, en estas características destaca un grupo conformado por: L-13, Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014 con rendimientos de: 2 374, 2 066, 1 969 kg ha⁻¹ como los más promisorios respectivamente. Sin embargo, se puede evidenciar líneas que tienen rendimientos bajos

como L-10, L-6, L-12, L-5 con rendimientos de 1 197, 1 365, 1 410, 1 557 kg ha⁻¹. Las líneas que destacan para las variables fenológicas: DM1, DF, NPM con L-3, L-4, L-12, L-6, como las más tardías con 152, 157, 149, 150 días. Se puede observar genotipos como las líneas L-10, L-11, L-9, L-15, L-14, que son más precoces con 122, 124, 129, 132, 135 días, sin embargo, las líneas para la variable calidad física destacan el pH, que conforman las líneas L-7, L-11, L-15 y L-9 con valores de 61, 62.3, 59.6 y 60.8 kg hl⁻¹.

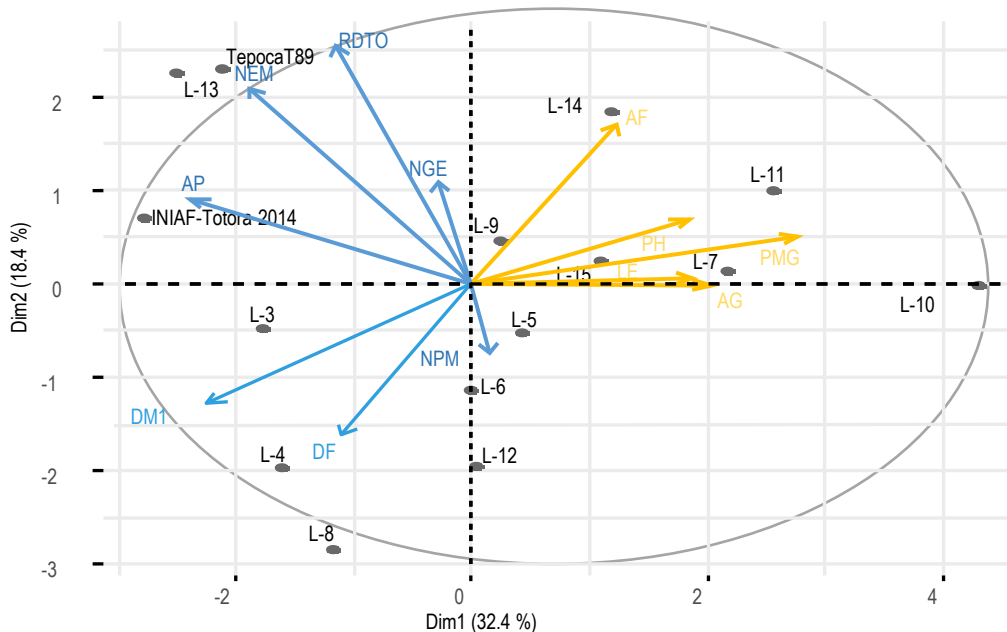


Figura 7. Análisis Biplot de los componentes principales entre las variables: NPM = número de plantas por metro cuadrado, DF = días a floración, AP = altura de planta, AF = área foliar, NEM = número de espigas por metro cuadrado, LE = longitud de espigas, DESP1 = días a espigamiento, NGE = número de granos por espiga, LA = longitud de la arista, DM1 = días a la madurez, PMG = peso de mil granos, PH = peso hectolítrico, AG = área de grano, RDTO = rendimiento para la aptitud productiva de 13 líneas élités de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

Ranking de rendimiento

En el ranking de rendimiento (Figura 8) elaborado en base al promedio estandarizado en las trece líneas élités de trigo harinero se observa que la L-13 destaca por tener rendimiento alto seguido de los testigos Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014 y las líneas L-14, L-15. Sin embargo, las líneas: L-5, L-11, L-7, L-3, L-12, L-6, L-9, L-10, L-4 y L-8 tienen rendimientos por debajo

de la media general. Analizando los rendimientos de las líneas se puede presenciar la superioridad de las líneas L-13, L-14, L-15 respecto al promedio registrado en zonas tradicionales que oscila entre 0.7 a 0.9 t ha⁻¹ reportado por Marza et al. (2015) en esa misma línea el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023) menciona que en los últimos diez años (2013-2022) el rendimiento nacional de trigo se estimó en 1.1 t ha⁻¹.

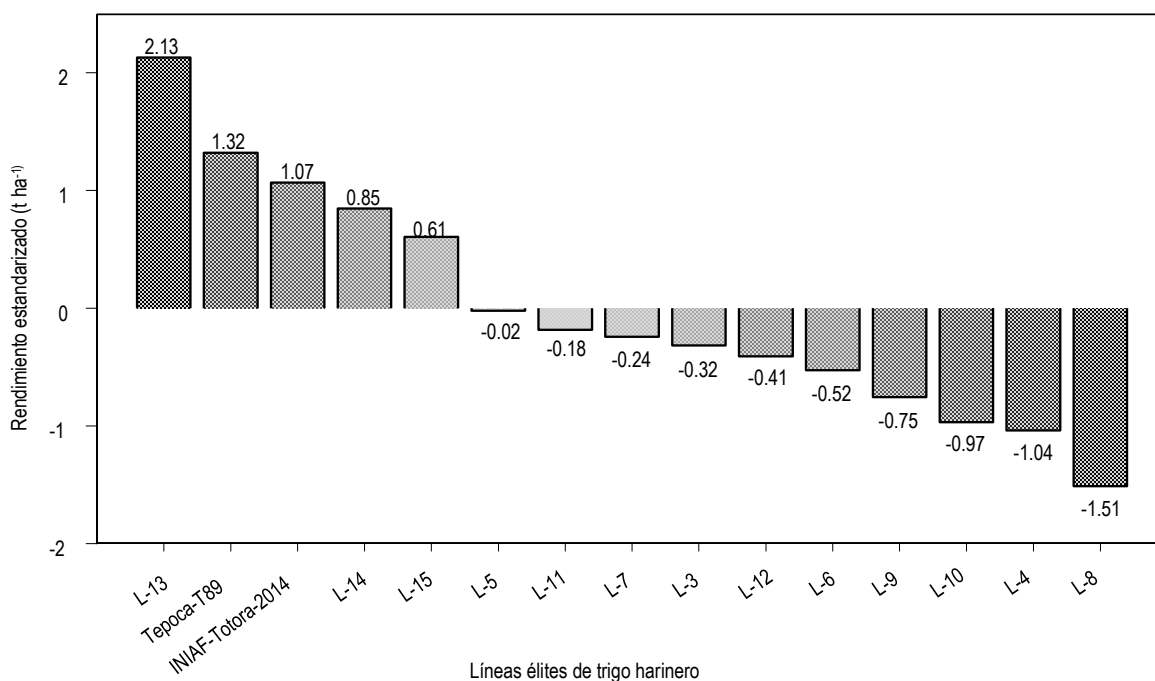


Figura 8. Ranking de rendimiento estandarizado para la aptitud productiva de 13 líneas élités de trigo harinero, gestión agrícola 2022-2023.

CONCLUSIONES

Las líneas élités con características agronómicas sobresalientes para el componente de rendimiento bajo condiciones agro meteorológicas del Altiplano Central de Bolivia, en la Estación Experimental Patacamaya muestra un ciclo de vida del cultivo que comprende siete meses de noviembre a mayo y corresponde a resultados conformando por 11 grupos, para el primer grupo L-13 con 2 374 kg ha⁻¹ pudiéndose notar que corresponde al rendimiento más alto seguido del segundo, tercero, cuarto, quinto y sexto grupo conformado por Tepoca-T89, INIAF-Totora-2014, L-14, L-15, L-5 con 2 066 a 1 557 kg ha⁻¹ que corresponden a rendimientos intermedios respectivamente. Producto del déficit hídrico traducidos en sequía durante los meses de noviembre, enero y abril causando daños significativos en el desarrollo del ciclo del cultivo.

Al identificar correlaciones entre variables agronómicas, fenológicas, fisiológicas de rendimiento y calidad en las 13 líneas élités de trigo harinero se observa una correlación múltiple entre cada par de características donde se evidencia 120 coeficientes en el que se consideró correlaciones más importantes con relación al rendimiento como las variables agronómicas, fenológicas de rendimiento y calidad donde se han identificado relaciones significativas entre variables que influyen en el rendimiento.

El método de análisis de componentes principales permitió identificar variables que más han contribuido a la productividad; el primer componente formado por las variables: área de grano, peso de mil gramos, longitud de espiga, peso hectolítrico y área foliar. El segundo componente constituido principalmente por las variables como días a floración y días a maduración.

Según el ranking de rendimiento se observa que la L-13 se destaca por tener rendimientos altos seguida de los testigos Tepoca-T89, INIAF-Tотора-2014 y las líneas L-14, L-15. Sin embargo, las líneas: L-5, L-11, L-7, L-3, L-12, L-6, L-9, L-10, L-4 y L-8 tienen rendimientos por debajo de la media general.

Agradecimientos

Al INIAF-La Paz por la entrega del material biológico por medio del programa Nacional de trigo. Al Ing. Roberto Butrón Ticona jefe de investigaciones (INIAF) que en paz descanse (†) profesional investigador del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) por la facilitación del material genético de trigo harinero procedente del PN-Trigo.

BIBLIOGRAFÍA

- Butrón, R; Michma, R; Silva, E; Siñani, O. 2016. Características de grano relacionados con rendimiento de trigo (en línea). La Paz, s.e. Consultado 30 may 2024. Disponible en http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rciii/v1n6/v1n6_a11.pdf
- Donley, A. 2023. La FAO proyecta un rendimiento mundial récord del trigo, grano mundial (en línea, sitio web). Consultado 9 ene. 2024. Disponible en <https://www.world-grain.com/articles/18067-fao-projects-record-global-wheat-outturn>
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2023. Agricultura-INE (en línea). Consultado 22 ene. 2024. Disponible en <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/agropecuaria/agricultura-cuadros-estadisticos/>
- Marza, F; Butrón, R; Quispe, F; Gutierrez, G; Huallpa, B; Vaca, L; Jerez, E. 2015. Estabilidad en genotipos de trigo harinero en condiciones semiáridas (en línea). Revista Científica de Investigación INFO-INIAF 1:1-2. Consultado 30 nov. 2023. Disponible en http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-250X2015000200003&lng=en&nrm=iso
- Molina, M; Gutiérrez, I. 2021. Análisis del complejo productivo del trigo (en línea). La Paz, Bolivia, s.e. Consultado 4 jul. 2024. Disponible en <http://www.siip.produccion.gob.bo/noticias/files/2024-f0723-LIBRO-complejo-productivo-TRIGO-.pdf>
- Quispe, F; Marza, F; Butrón, R; Gutiérrez, I. sf. Evaluación preliminar de 138 genotipos de trigo harinero con aptitud para zonas semiáridas (en línea). Consultado 30 may 2024. Disponible en http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rciii/v1n6/v1n6_a07.pdf
- Senbeta, AF; Worku, W. 2023. Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. Heliyon 9(10):e20720. Consultado 15 mar. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E20720>
- Sher, A; Khan, A; Hussain, S; Jin Cai, L; Irfan Ahmad, M; Ali Jamro, S; Rashid, A. 2010. Significance of chemical priming on yield and yield components of wheat under drought stress (en línea). American Journal of Plant Sciences 8:1339-1344. Consultado 11 mar. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.86090>
- Thungo, Z; Shimelis, H; Odindo, AO; Mashilo, J. 2020. Assessment of terminal drought tolerance among elite wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using selected agronomic and physiological traits (en línea). Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science 70(3):177-194. Consultado 18 oct. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1691644>
- Vergara-Díaz, O; Kefauver, SC; Elazab, A; Nieto-Taladriz, MT; Araus, JL. 2015. Grain yield losses in yellow-rusted durum wheat estimated using digital and conventional parameters under field conditions. The Crop Journal 3(3):200-210. Consultado 18 feb. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.03.003>
- Yapu, W. 2014. Adaptabilidad de 21 líneas avanzadas precoces de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) en la Estación Experimental de Kallutaca. s.l., s.e.
- Zambrano, MM. 1986. Peso del hectolitro en trigo (en línea). Consultado 30 may 2024. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/33909>
- Zhang, D; Liu, J; Li, D; Batchelor, WD; Wu, D; Zhen, X; Ju, H. 2023. Future climate change impacts on wheat grain yield and protein in the North China Region. Science of The Total Environment 902:166147. Consultado 11 feb. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166147>

Artículo recibido en: 01 de abril del 2024

Aceptado en: 22 de agosto del 2024