

Estabilidad en genotipos de trigo harinero en condiciones semiáridas

Félix Marza, Butrón Roberto, Félix Quispe, Gilberto Gutierrez, Benjamín Huallpa, Lisett Vaca y Erwin Jerez

Programa Nacional de Trigo, Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF),

Av. Blanco Galindo km 5.5, Casilla 832, Cochabamba, Bolivia.

felix.marza@fulbrightmail.org

Resumen

Con el objetivo de identificar alternativas tecnológicas traducidas en variedades de alta productividad y calidad, se evaluaron 50 líneas de trigo de introducidas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) seleccionadas para zonas semiáridas. El estudio fue desarrollado entre el 2011 al 2014. La población de líneas fue establecida en ambientes con alta capacidad de discriminación de G*A. Los procesos de selección y de cuantificación de la interacción de genotipo*ambiente fueron realizados en el marco de la red nacional de trigo del Programa de mejoramiento del INIAF. Se aplicó una gama variada de herramientas de análisis, desde estadística descriptiva hasta métodos multivariados adecuados para los propósitos de fitomejoramiento. Se cuantificó y cualificó un total de 30 variables en las primeras etapas. Durante el desarrollo de líneas élite se alcanzó a evaluar un promedio de 12 variables entre agronómicas de adaptabilidad hasta componentes de rendimiento. Se alcanzó a identificar localidades con alta capacidad de discriminación de la interacción genotipo-ambiente. Se identificaron líneas elite con adaptabilidad y estabilidad para zonas trigueras del sur del país (líneas 333 y 331) así mismo, cultivares con adaptabilidad y estabilidad para condiciones de valle del departamento de Cochabamba (línea 337). Se identificó material con alta capacidad productiva y amplia adaptabilidad (línea 330).

Palabras clave: trigo, adaptabilidad, estabilidad, Biplot.

Abstract

In order to identify technological alternatives through varieties of high productivity and quality, 50 wheat lines introduced from the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), genotypes selected for semi-arid conditions. The study was developed between 2011 to 2014. The population of lines was established in environments with high capacity of G*A discrimination. Selection processes and quantification of the interaction of G*E were conducted under the national network for wheat improvement of INIAF. A wide range of statistical analysis tools were applied, from descriptive statistics to suitable multivariate methods for breeding purposes. A total of 30 variables were quantified and the beginning. During the development of elite lines an average of 12 variables were considered including agronomic adaptability to yield components. The study identified environments with high capacity of G*E discrimination. Elite lines with promising adaptability and stability were identified for the south region (lines 333 and 331), likewise, cultivars with adaptability and stability conditions to valley of Cochabamba (line 337) were recognized. Furthermore a promising elite line with high production capacity and wide adaptability (line 330) was identified.

Introducción

El trigo (*Triticum aestivum*, L.) es el cereal más ampliamente cultivado en el mundo en términos de superficie, actualmente es el alimento más estable e importante para una población de cerca de dos billones (36% de la población mundial). A nivel global, el trigo provee cerca del 55% de los carbohidratos y al

presente provee un promedio de alrededor del 20% de calorías consumidas por el hombre. El trigo básicamente es un cultivo de clima templado; pero debido a su diversidad genética, éste ha extendido sus fronteras y ha llegado a adaptarse casi a todos los climas y alturas del mundo. En Bolivia el trigo se constituye en

la base alimenticia de la población. El consumo per cápita es de 69 kg*año⁻¹, la demanda anual alrededor de 700.000 t, el análisis histórico (últimos 10 años) indica que la producción se encuentra entre 145 a 255 mil t*año⁻¹, representando del 21 al 36% de satisfacción de la demanda interna. El rendimiento nacional entre 0.9 a 1.4 t*ha⁻¹, mejores en el oriente (0.9 a 1.9 t*ha⁻¹) que en el área tradicional (0.7 a 0.9 t*ha⁻¹).

La mejora de la productividad sumada a la tolerancia a factores bióticos y abióticos adversos es esencial para responder al incremento poblacional y al crecimiento de la demanda. El trabajo del Programa Nacional de Trigo (PN-TRIGO) del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) consiste en encontrar alternativas viables de solución a cuellos de botella tecnológicos cuya solución origine saltos cualitativos y cuantitativos significativos en la competitividad del trigo, esto, a través del desarrollo sostenible de variedades de alta estabilidad, alto potencial genético para rendimiento, buena calidad, tolerantes a factores bióticos y abióticos adversos con sus correspondientes recomendaciones de manejo, que permitan según el tipo de productores, optimizar su potencial productivo, coadyuvando de ésta manera a la política nacional de seguridad con soberanía alimentaria.

La estabilidad en el rendimiento de trigo, se cuantifica con la finalidad de proporcionarle certeza al productor y desde el ámbito técnico consiste en determinar la adaptación de líneas específicas avanzadas a un ámbito de ambientes productivos donde el rubro es de importancia. Los ambientes pueden variar en prácticas de manejo, la presión de factores bióticos, así como en condiciones edáficas y climáticas. Las posiciones relativas entre los genotipos evaluados en diferentes ambientes a menudo difieren entre ellas, por lo que se dificulta la identificación del genotipo más deseable (Eberhart y Russell 1966; Poysa *et al.* 1986). Estos desafíos se incrementan conforme el grado de variabilidad es mayor entre los ambientes o dentro de la especie (Allard y Bradshaw 1964). Los mejoradores disponen de los análisis de estabilidad, que les permiten determinar si los cultivares existentes o las líneas avanzadas se adaptan a condiciones ambientales favorables, desfavorables, o a ambas. La idea es identificar los sitios con condiciones óptimas para una determinada línea, y reunir la mayor cantidad de información posible acerca de comportamiento en diversos ambientes con el fin de zonificar su producción.

En el marco de los desafíos integrales de la cadena de valor, el programa de mejoramiento del INIAF pretende contribuir con la generación de variedades estables en su producción, particularmente para rendimiento y calidad, atributos que son muy importantes al momento de que los productores adopten los nuevos cultivares. La interacción genotipo por ambiente (G*A) representa una de las principales dificultades encontradas en los procesos de selección; lo que puede ocasionar que los mejores en un ambiente no sean los mejores en otro, dificultando el proceso de recomendación de cultivares para una amplia gama de ambientes; siendo necesario la selección de genotipos para un ecosistema o sistema de producción específico.

En el ámbito de la generación tecnológica (variedades, recomendaciones tecnológicas y otros) un elemento fundamental al momento de la adopción es la aversión al riesgo del productor, aspecto sobre el que se debe brindar certeza. En línea con el mencionado desafío, es imperativo contar con información respecto a la estabilidad fenotípica para explicar el efecto de la G*A sobre el comportamiento de los genotipos en estudio y determinar los mejores dominios de recomendación. En el presente estudio se apela a métodos convencionales como el de Eberhart y Russel y AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) para la identificación y selección de los cultivares que cumplen con el objetivo de presentar estabilidad en su comportamiento a través de localidades y años. El objetivo del estudio desarrollado en varias campañas y años fue la evaluación y selección de cultivares con alto rendimiento y estabilidad para identificar materiales superiores a ser recomendados para su adopción.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en el marco de la red nacional de investigación en trigo del INIAF durante las campañas agrícolas 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014 y en algunos departamentos incluido ciclos de invierno principalmente para incremento de semilla de mejorador.

Originalmente, las líneas fueron desarrolladas en el Programa de Mejoramiento Genético del CIMMyT, que comprendió el proceso de hibridación (F1), mismos que posteriormente fueron valorados en base a criterios y prioridades como ser: Alto potencial de rendimiento, tolerancia a enfermedades, eficiencia en el uso del agua, tolerancia a factores abióticos adversos y adecuada calidad.

Tabla 1. Genotipos introducidos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo en la gestión 2011, evaluados en diferentes localidades del área triguera tradicional de Bolivia.

Nro	Cruzas	Lineas /
1	Tepoca T89	Testigo
2	DHARWAR DRY	302
3	VOROBAY	303
4	W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1	304
5	POTCH 93/4/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/5/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	305
6	ACHTAR*3//KANZ/KS85-8-5/4/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/5/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	306
7	QG 4.37A/4/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/5/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	307
8	NSM*4/14-2//FRTL/2*PIFED/3/VORB	308
9	BABAX/LR42//BABAX/3/BABAX/LR42//BABAX/4/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR/5/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	309
10	BABAX/LR42//BABAX/3/BABAX/LR42//BABAX/4/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR/5/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	310
11	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ/5/ONIX	311
12	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ/5/ONIX	312
13	ONIX/ROLF07	313
14	ONIX/ROLF07	314
15	ONIX/4/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	315
16	ACHTAR/4/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	316
17	CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR/4/BAV92/5/FRET2/KUKUNA//FRET2/6/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	317
18	CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR/4/BAV92/5/FRET2/KUKUNA//FRET2/6/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	318
19	CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR/4/BAV92/5/FRET2/KUKUNA//FRET2/6/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	319
20	CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR/4/BAV92/5/FRET2/KUKUNA//FRET2/6/MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	320
21	MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/4/ATTILA/BAV92//PASTOR/5/CNO79//PF70354/MUS/3/PASTOR/4/BAV92	321
22	SOKOLL*2/TROST	322
23	SOKOLL*2/TROST	323
24	SOKOLL//PBW343*2/KUKUNA/3/ATTILA/PASTOR	324
25	SOKOLL*2/ROLF07	325
26	GK ARON/AG SECO 7846//2180/4/2*MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	326
27	GK ARON/AG SECO 7846//2180/4/2*MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	327
28	GK ARON/AG SECO 7846//2180/4/2*MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92	328
29	SW89-5124*2/FASAN/3/ALTAR 84/AE.SQ//2*OPATA	329
30	SOKOLL/ROLF07	330

Nro	Cruzas	Líneas /
31	SOKOLL//FRTL/2*PIFED	331
32	SOKOLL//FRTL/2*PIFED	332
33	BAV92/SERI	333
34	ROLF07/3/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	334
35	ROLF07/3/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	335
36	MILAN/KAUZ//PRINIA/3/BAV92/4/WBLL1*2/KUKUNA	336
37	ATTILA/BAV92//PASTOR/3/ATTILA*2/PBW65	337
38	CUNNINGHAM/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ	338
39	ESDA/KKTS	339
40	GOUBARA-1/2*SOKOLL	340
41	SOKOLL*2/3/PASTOR//MUNIA/ALTAR 84	341
42	SOKOLL*2/3/PASTOR//MUNIA/ALTAR 84	342
43	SOKOLL*2/4/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//FCT/3/STAR	343
44	SOKOLL*2/4/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//FCT/3/STAR	344
45	BOW/VEE/5/ND/VG9144//KAL/BB/3/YACO/4/CHIL/6/CASKOR/3/CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA/7/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BAV92	345
46	BOW/VEE/5/ND/VG9144//KAL/BB/3/YACO/4/CHIL/6/CASKOR/3/CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA/7/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BAV92	346
47	BOW/VEE/5/ND/VG9144//KAL/BB/3/YACO/4/CHIL/6/CASKOR/3/CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA/7/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BAV92	347
48	GONDO//WBLL1*2/TUKURU/4/GONDO//SHA5/WEAVER/3/PASTOR	348
49	PASTOR*2/BAV92/5/FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ	349
50	PASTOR*2/BAV92/5/FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ	350

Las 50 líneas arriba detalladas fueron introducidas por su aptitud para zonas semiáridas (precipitación menor a 400 mm año⁻¹), constituyendo material con un grado de homocigosidad avanzado y de alto potencial productivo. La población arriba mencionada fue una de las primeras introducciones realizada por el PN-TRIGO y estudiada a lo largo de cuatro años en múltiples localidades en los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca, Tarija, Potosí y eventualmente Santa Cruz.

En la campaña agrícola 2011-2012, la población fue establecida en dos localidades: Montenegro en el municipio de Sipe Sipe, Provincia Quillacollo del departamento de Cochabamba y

en San Pedro del municipio del mismo nombre, provincia Obispo Santistevan del departamento de Santa Cruz. El material fue establecido en base a la estructura de un diseño alpha-latice con dos repeticiones y con el propósito de contar con la información completa de sus aptitudes se cuantificó y cualificó un total de treinta variables.

Con el material incrementado y con la finalidad de realizar una apropiada explotación de la variabilidad genética, en la campaña agrícola 2012-2013, se emprendió ensayos del material arriba mencionado en múltiples localidades con énfasis en el área tradicional como se verifica en la tabla siguiente:

Tabla 2. Localidades, municipio, provincia y departamentos en los que fueron establecidos los ensayos durante la campaña agrícola 2012-2013.

Departamento	Provincia	Municipio	Localidad
Cochabamba	Carrasco	Pocona	Yuraj Molino
	Carrasco	Totora	Rodeo Grande
	Esteban Arce	Tarata	Tarata
Santa Cruz	Florida	Quirusillas	Quirusillas
Potosí	Alonso de Ibañez	Caripuyo	Caripuyo
	José María Linares	Ckochas	Rumi Wiñaska
Chuquisaca	Zudañez	Zudañez	Zudañez
	Yamparaez	Yamparaez	Sirichaca
	Tomina	Villa Alcalá	Alcalá
Tarija	Cercado	Tarija	Yesera norte
La Paz	Bautista Saavedra	Charazani	Charazani
Oruro	Cercado	Caracollo	Condoriri

Por los progenitores involucrados y la variabilidad existente en la población, se logró identificar un número significativamente alto de líneas promisorias a través de la evaluación de los índices de estabilidad de las variables de interés, habiéndose

alcanzado una presión de selección del 30%, el material identificado por los propósitos señalados son los que se indica en la tabla siguiente:

Tabla 3. Genotipos élitos seleccionados de la primera (2011-2012) y segunda (2012-2013) campaña a ser sometido a ensayos regionales.

Nro.	Cruzas	Líneas
1	Tepoca T89	Variedad (Testigo)
2	PASTOR*2/BAV92/5/FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ	349
3	ONIX/ROLF07	313
4	ROLF07/3/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	335
5	ATTILA/BAV92//PASTOR/3/ATTILA*2/PBW65	337
6	NSM*4/14-2//FRTL/2*PIFED/3/VORB	308
7	ESDA/KKTS	339
8	SOKOLL*2/ROLF07	325
9	SOKOLL*2/TROST	323
10	SOKOLL/ROLF07	330
11	ROLF07/3/T.DICOCCON PI94625/AE.SQUARROSA (372)//3*PASTOR	334
12	FRET2*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ/5/ONIX	311
13	SOKOLL//FRTL/2*PIFED	332
14	BAV92/SERI	333
15	SOKOLL//FRTL/2*PIFED	331

La población de líneas elite identificada fue sometida a ensayos regionales durante la campaña agrícola 2013-2014, bajo la

estructura de un diseño de bloque completo al azar con 3 repeticiones en las localidades que se indica a continuación:

Tabla 4. Localidades, municipios, provincias y departamentos en los que fueron establecidos los ensayos durante la campaña agrícola 2013-2014.

Departamento	Provincia	Municipio	Localidad
Cochabamba	Carrasco	Pocona	Pocona
	Carrasco	Pocona	Cruce Incallajta
	Carrasco	Totora	Uyaxtipunta 1
	Carrasco	Totora	Chullpa Chullpa bajo
Santa Cruz	Florida	Quirusillas	Quirusillas
	Manuel María Caballero	Comarapa	Comarapa
Potosí	Sud Lipez	San Pablo de Lipez	Esmeralda alta 2
	José María Linares	Ckochas	Rumi Wiñaska
Chuquisaca	Yamparaez	Yamparaez	Pampas
	Zudañez	Zudañez	Zudañez
	Zudañez	Mojocoya	Trigo Loma
	Nor Cinti	Incahuasi	Jolencia
Tarija	Eustaquio Méndez	San Lorenzo	Carachimayo
	Eustaquio Méndez	Eustaquio Méndez	Coimata
	Gran Chaco	Yacuiba	Campo Núñez
La Paz	Los Andes	Laja	Kallutaca
	Bautista Saavedra	Charazani	Charazani
Oruro	Cercado	Caracollo	Condoriri

Análisis de varianza: Con la información obtenida para cada variable considerada en el estudio se procedió con los análisis estadísticos correspondientes. Se realizó la identificación de datos fuera de contexto, se continuó con los respectivos resúmenes y análisis de varianza para cada localidad en función al modelo establecido. Para los ensayos de la primera campaña se realizó el análisis de varianza en base al modelo de alpha látice. Para explicar el comportamiento de cualquier genotipo en los diferentes ambientes (localidades) se realizó el análisis de varianza combinado para las diferentes variables agronómicas consideradas en el estudio.

Análisis de estabilidad: Para el análisis de estabilidad fenotípica se utilizaron los métodos propuestos por Eberhart y Russell, 1966 y el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa, Crossa, 1996.

Modelo de Eberhart y Russell: Se basa en análisis de regresión lineal simple. El coeficiente de regresión lineal (β_i) es utilizado como respuesta del comportamiento de cada genotipo

en los diferentes ambientes y la estabilidad de cada genotipo es evaluada a través de varianza de los desvíos de regresión (δ_{ij}). El modelo responde a la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu_i + \beta_i I_j + \delta_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = promedio del i-esimo genotipo en el j-esimo ambiente.

μ_i = promedio del i-esimo genotipo en todos los ambientes.

β_i = coeficiente de regresión que mide la respuesta del i-esimo genotipo a la variación ambiental.

I_j = índice ambiental.

δ_{ij} = desvío de la regresión del i-esimo genotipo en el j-esimo ambiente.

ϵ_{ij} = la desviación de la regresión de la variedad y el ambiente. El índice ambiental, en cada ambiente es calculado por el desvío del promedio de todos los genotipos en ese ambiente, en relación con el promedio general: $I_j = Y_{.j} - Y_{..}$

El análisis AMMI (efectos aditivos y multiplicativos): El modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) combina análisis de varianza y análisis de componentes principales en un único modelo, aditivo para los efectos principales de genotipos y ambientes y multiplicativo para los efectos de interacción de genotipo por ambiente. El Biplot se construyó a partir de los datos de rendimiento de varios años en cada localidad mediante el modelo lineal / bilineal AMMI. El modelo AMMI está representado por la ecuación siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + \sum \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn} + \varepsilon_{ij}$$

Donde es Y_{ij} representa la media del i-esimo cultivar en el j-esimo ambientes definido como una combinación única del sistema x año, μ es la media general, G_i y E_j son los efectos principales atribuidos al genotipo (cultivar) y ambiente sistema año, λ_n es el valor singular del n-esimo eje del Componente Principal, γ_{in} y δ_{jn} representan las puntuaciones para el i-esimo cultivar y el j-esimo medio ambiente en el n-esimo eje del componente principal y ε_{ij} es el error experimental agrupado.

El análisis combinó los resultados en un simple Biplot para cada localidad para proporcionar una detección más conservadora de las interacciones del genotipo x sistema repetido a través de los años. Se adoptó el programa SAS de Burgueño *et al.* (2003) para generar las puntuaciones de los entornos de sistema de año y genotipos para los dos primeros términos bilineales ($n = 2$). El análisis AMMI fue importante para la identificación de grupos de ambientes de igual respuesta, ambientes que permiten mejor discriminación del potencial genético entre genotipos y ambientes correlacionados negativamente.

Entre las principales variables de respuesta evaluadas se tiene: características agromorfológicas (días a emergencia, porte de

la planta, precocidad, altura de la planta, posición de la espiga, densidad de la espiga, color de la espiga, color de grano, longitud de arista); tolerancia a factores adversos bióticos (roya, septoria, piricularia, helmintosporium); tolerancia a factores adversos abióticos (tolerancia a sequía, reacción al acame, reacción al desgrane); componentes de productividad (número de macollos, número de espigas/m², longitud de espiga, número de granos/espiga, tipo de grano, tamaño de grano, peso de mil granos, rendimiento) y componente de calidad (peso hectolítrico).

Resultados y discusión

Resumen descriptivo de variables: La respuesta promedio de la población de líneas en las distintas localidades se describe en la tabla siguiente. En ella se verifica características agromorfológicas interesantes asociadas a la población en estudio. Se distingue atributos como la precocidad con rangos muy significativos que hacen prever desenlaces muy promisorios en cuanto a la identificación de cultivares para los desafíos del Programa. En la misma línea, se aprecia características agromorfológicas transgresivas que permiten avizorar respuestas optimistas en los procesos de selección. Respecto a la tolerancia a factores adversos, se pudo evidenciar alta variabilidad entre líneas, evidenciándose la posibilidad de generar un buen avance genético con respecto a la selección de líneas tolerantes, destacándose material con muy buena respuesta con relación a piricularia y roya principalmente. La tolerancia al desgrane mostró fenotípicamente variaciones diametralmente opuestas, encontrándose líneas con alta tolerancia al desgrane temprano y otras muy susceptibles. El comportamiento del material estuvo en línea con la aptitud inicialmente descrita (adaptación a zonas semiáridas).

Tabla 5. Estadística descriptiva de características cualitativas y cuantitativas de líneas avanzadas de trigo harinero del vivero 19 SAWYT introducidas del CIMMYT, evaluadas en 15 localidades de Bolivia, durante la campaña agrícola 2011-2013.

Variab	Rango	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
Características Agromorfológicas					
Días a emergencia	5,0	4,0	8,0	4,0	1,6
Porte de la planta ^e	3,0	2,0	5,0	4,9	0,4
Precocidad ^e	4,0	1,0	5,0	3,2	1,2
Altura de planta (cm)	89,0	23,0	112,0	70,0	14,2
Posición de espiga ^a	4,0	1,0	5,0	3,1	1,9
Densidad de espiga ^a	4,0	1,0	5,0	3,5	0,8
Color de espiga ^a	4,0	1,0	5,0	1,6	1,1
Color de grano ^a	3,0	2,0	5,0	4,7	0,8
Longitud de arista (mm)	14,0	3,0	17,0	6,9	1,3
Tolerancia a factores adversos bióticos					
Roya ^g	2,0	3,0	5,0	4,6	0,5
Septoria ^g	3,0	2,0	5,0	4,1	0,6
Piricularia ^g	4,0	1,0	5,0	4,3	0,8

Variables	Rango	Mínimo	Máximo	Media	D.E.
Helminthosporium [§]	4,0	1,0	5,0	4,1	0,8
Tolerancia a factores adversos abióticos					
Tolerancia a sequía [¶]	4,0	1,0	5,0	4,0	1,0
Reacción al acame [¶]	4,0	1,0	5,0	4,7	0,6
Reacción al desgrane [¶]	3,0	2,0	5,0	4,7	0,6
Componentes de productividad					
Número de macollos	4,3	1,0	5,3	3,4	0,8
Número de espigas*m ²	262,0	8,0	270,0	116,1	67,1
Longitud de espiga (cm)	11,5	2,2	13,7	8,3	1,6
Número de granos*espiga ¹	66,0	12,0	78,0	52,4	9,3
Tipo de grano [¶]	4,0	1,0	5,0	3,2	1,3
Tamaño de grano [¶]	4,0	1,0	5,0	2,5	1,3
Peso de mil granos (g)	39,0	19,0	58,0	37,2	8,6
Rendimiento (kg*ha ⁻¹)	5337,0	1,0	5338,0	1408,9	966,3
Componentes de calidad					
Peso hectolítrico	49,0	40,0	89,0	72,3	8,9

[§]1 = Muy decumbente; 2 = decumbente; 3 = semi decumbente; 4 = semierecto; 5 = erecto

[¶]1= Muy Tardío; 2 = Tardío; 3 = Intermedio; 4 = Precoz; 5 = Muy Precoz

[¶]1 = Recto; 5 = Curvado

[¶]1 = Muy Laxa; 2 = Laxa; 3 = moderadamente compacta; 4 = Compacta; 5 = Muy compacta

[¶]1 = Púrpura (morado) a negro; 3=rojo a café; 5=blanco

[¶]1 = Púrpura (morado); 3=rojo; 5=blanco

[¶]1 = Muy Susceptible; 2 = susceptible; 3 = moderadamente tolerante; 4 = tolerante; 5 = muy tolerante

[¶]1 = Muy Susceptible; 2 = susceptible; 3 = moderadamente tolerante; 4 = tolerante; 5 = muy tolerante

[¶]1 = Muy chupado; 2 = chupado; 3 = casi lleno; 4 = lleno; 5 = Muy lleno

[¶]1 = Grano pequeño (< 6 mm); 3 = grano mediano (6 – 7 mm); 5 = grano grande (> 7 mm)

Las variables relacionadas con componentes de rendimiento mostraron comportamientos relativamente dispersos, ejemplo, número de macollos por planta con promedio para las líneas de 3.4 macollos, longitud de espiga alcanzó un promedio de 8.3 cm con una máxima de 13.7 cm y una mínima de 4.2 cm. El estimado promedio para peso de mil granos fue de 37.2 g con una dispersión de ± 8.6 . Para la variable de rendimiento propiamente dicho, el estimado del promedio fue 5337.0 kg*ha⁻¹, siendo ésta una de las variables exhibiendo mayor variación, pudiendo la misma atribuirse a la naturaleza de las condiciones experimentales a lo largo del país. El número de granos por espiga alcanzó un promedio de 52.4.

Análisis de Componentes Principales: Con el propósito de transformar variables altamente correlacionadas en componentes principales no correlacionados, la descomposición de los dos primeros componentes principales alcanzo a explicar el 34% de la variabilidad en el estudio. La representación gráfica de componen-

tes principales de la figura siguiente sintetiza el comportamiento de las diferentes líneas con relación a las variables cuantificadas y cualificadas en el estudio. Como la recomiendan, la lectura se realizó considerando la magnitud del vector, la dirección de los mismos y el ángulo que forman entre sí. De la representación gráfica se logra inferir la presencia de varios grupos de variables, entre ellas las de componentes de rendimiento, tolerancia a factores adversos, características de calidad entre otros. La magnitud de los vectores para las variables se encuentra en correspondencia con la proporción de la información de los componentes identificados. De la representación de variables y cultivares se logró identificar el nivel de correlación, por ejemplo rendimiento, entre ellos número de espigas por metro, con líneas que muestran tolerancia a la sequía, tamaño de grano, peso de mil granos, tipo de grano y peso hectolítrico. En esta asociación descrita, se destaca la ubicación de las líneas L-330, L-331, L-337, L-339 y L-303. Así mismo líneas como L-323, L- 322, L-315 y L-341 que destacan como tolerantes a enfermedades de Piricularia, Roya y Septoria respectivamente

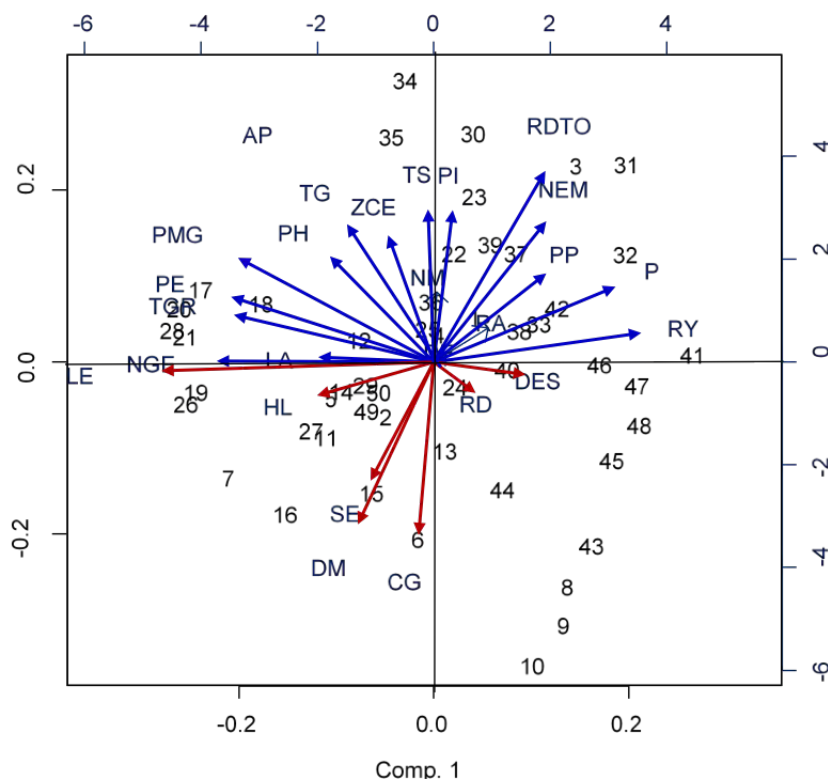


Figura 1. Análisis Biplot de la caracterización de las líneas avanzadas de trigo harinero del vivero 19 SAWYT, introducidas del CIMMYT; evaluadas en 13 localidades de Bolivia, durante la campaña agrícola 2011-2013. Las características evaluadas fueron: altura de planta (AP), tamaño de grano (TG), color de espiga (CE), tolerancia a la sequía (TS), número de macollos (NM), tolerancia a la piricularia (PI), rendimiento (RDTO), número de espigas por metro cuadrado (NEM), porte de la planta (PP), reacción al acame (RA), precocidad (P), tolerancia a la roya (RY), densidad de espiga (DES), días a la emergencia (DE), reacción al desgrane (RD), color de grano (CG), días a la madurez (DM), tolerancia a la septoria (SE), tolerancia a helmintosporium (HL), longitud de espiga (LE), número de grano por espiga (NGE), longitud de la arista (LA), tipo de grano (TGR), posición de la espiga (PE), peso de mil granos (PMG) y peso hectolítrico (PH)

Análisis de Varianza para Rendimiento: en la tabla 6 se presenta el análisis de varianza combinado a través de localidades para la variable rendimiento de grano ($t \cdot ha^{-1}$), en este análisis se observa diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre localidades, genotipos, localidades $\times$ genotipos. Similar respuesta es identificada para el 90% de las variables consideradas en el estudio (resultados no incluidos en este sector). El factor de

variación de localidades por genotipos (interacción) explica el grado diferencial en el comportamiento de los genotipos en las distintas localidades, verificándose una respuesta a la especificidad en términos de adaptabilidad a las condiciones ambientales y de factores de producción que ameritan un análisis más detallado a través de metodologías diseñadas para el efecto, a las que se apela más adelante.

Tabla 6. Análisis combinado para variable rendimiento en grano (kg*ha⁻¹) para 50 líneas de trigo harinero evaluados en 12 localidades durante las campañas agrícolas 2012 a 2014.

Fuentes de Variación	2011-2012			2012-2013		
	GL	CM		GL	CM	
Localidad	1	45319059.1	**	9	56231051.0	**
Rep (Loc)	2	38475.8	ns	10	3002919.5	**
Blq (Loc*Rep)	16	453348.2	**	80	138843.7	*
Genotipo	49	257311.6	ns	49	328875.2	**
Loc*Gen	49	249108.1	ns	441	160949.6	**
Error	82	203476.1		408	105624.9	
CV		17,6			25,1	
R ²		0,82			0,94	

Loc*Gen=Localidad por genotipo; Rep(Loc)=repeticiones anidadas en localidades; Bloq(Rep×loc)= bloques anidados en repeticiones por localidades; CV=coeficiente de variación.

* Significancia estadística al 5% de probabilidad

** Significancia estadística al 1% de probabilidad

ns No significancia estadística

Análisis GGE Biplot para Rendimiento: En la línea de explorar alternativas de análisis para la identificación de las especificidades en el comportamiento a través del análisis GGE Biplot, se observa que las líneas 330, 303, 304, 305, 315, 313, 347 y 346 se constituyen en los genotipos vértices, que exhiben su alto potencial productivo y su capacidad de respuesta en los sectores identificados por las respectivas localidades. Del análisis tam-

bién se desprende genotipos que tiene adaptabilidad específica a determinados condiciones medioambientales como las líneas 341, 333, 334, 337, 331, 323, 346 forman un grupo bastante interesante representando a las zonas trigueras de producción entre ellos la localidad de Zudáñez, Pocona, Rodeo Grande, Pocona y Rumi Wiñaska.

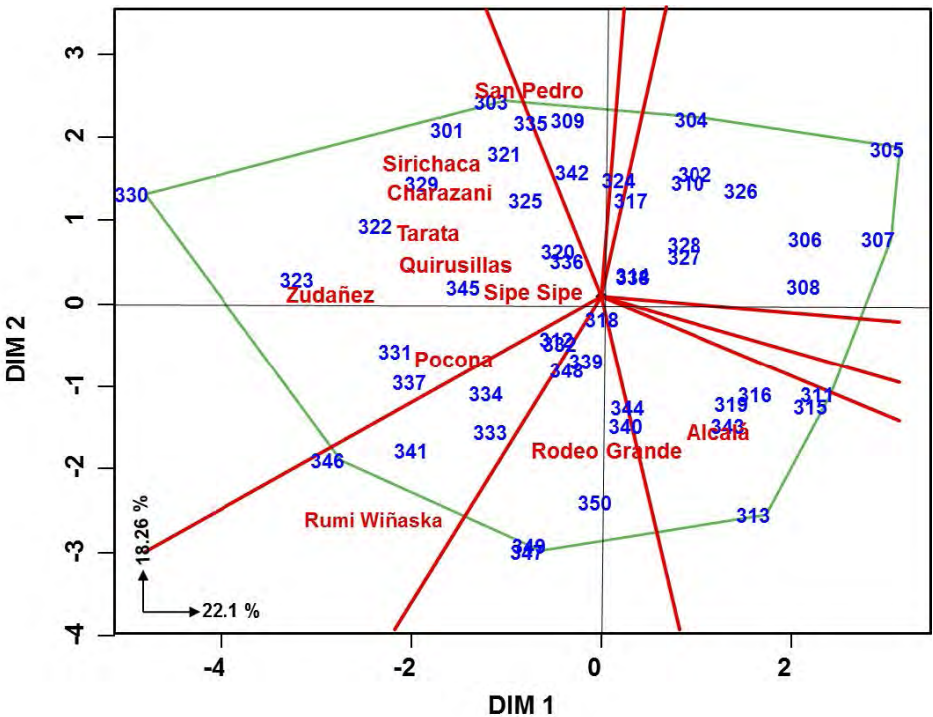


Figura 2. GGE Biplot basado en los datos de rendimiento resumiendo el comportamiento de quince líneas élite de trigo harinero con relación a catorce localidades en la campaña agrícola 2013 a 2014.

Genotipo ideal: La recta que pasa por el origen del Biplot representa el ambiente promedio y se denomina eje de las abscisas, donde las líneas 346, 323 y 330 tienen rendimiento medio alto, sin embargo su estabilidad es baja debido a que estas se

alejan del eje denominado abscisas. Sin embargo las líneas 337, 331, 341 y 322 muestran rendimiento medio y alta estabilidad en las catorce localidades, por lo tanto aproximándose al eje del genotipo ideal.

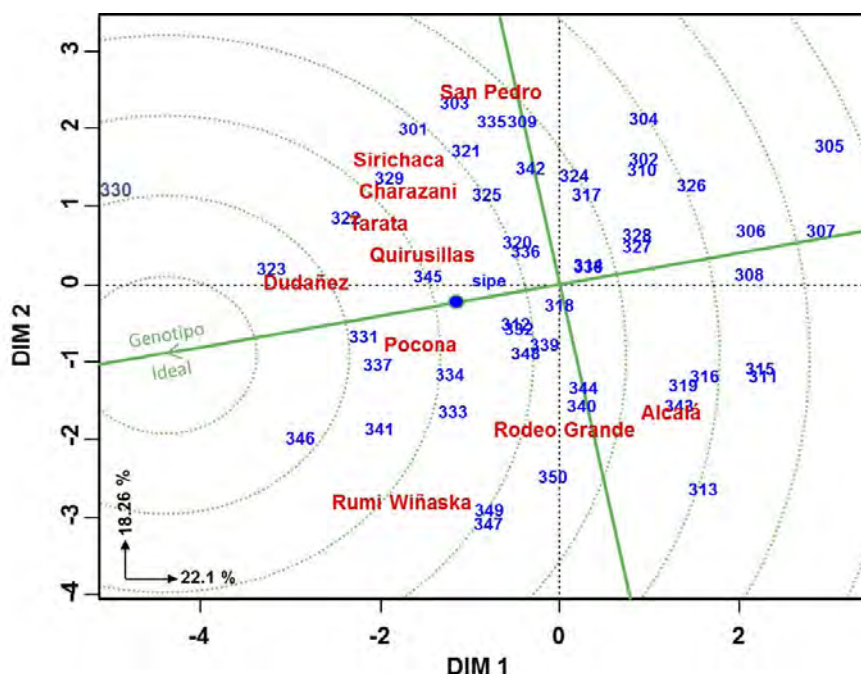


Figura 3. Gráfico Biplot de Rendimiento medio y estabilidad de las 15 líneas de líneas élite de trigo harinero con relación a catorce localidades en la campaña agrícola 2013 a 2014.

Productividad y Estabilidad del Rendimiento: la representación de rendimiento promedio ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de catorce líneas élite más un testigo en catorce localidades del área tradicional incluida algunas del altiplano durante la campaña agrícola 2013 a 2014 en la figura trellis, muestra la tendencia de comportamiento de la población en respuesta a los factores experimentales y la presión ambiental de las mismas. La respuesta obtenida en cada una de ellas refleja los factores de producción imperantes en las

mismas. Las características de un centro experimental se reflejan en Sipe Sipe con los promedios más altos, reflejando el potencial productivo de las diferentes líneas élite bajo condiciones óptimas. La productividad de las líneas que se refleja en la localidad de Cruce Incallajta representa condiciones de fertilidad apropiada pero en predios de agricultor en un año típico de disponibilidad de condiciones ambientales de un sistema de producción a secano.

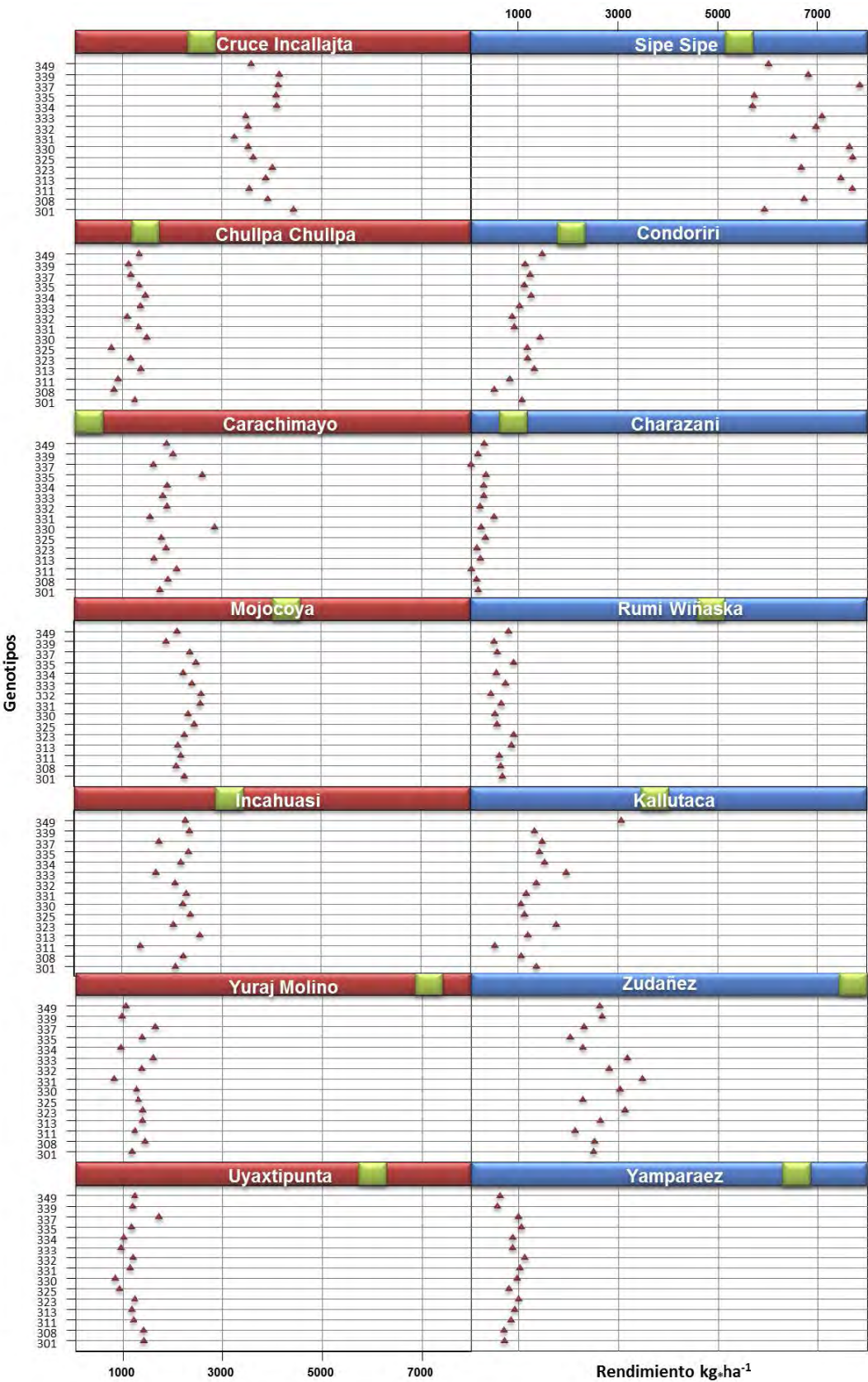


Figura 4. Panel Trellis para el rendimiento promedio (kg*ha-1) de catorce líneas élite de trigo harinero evaluadas en catorce localidades

durante la campaña agrícola 2013 a 2014.

Localidades del área tradicional con rendimientos promedios de entre 2 a 3 t. representan al promedio de las condiciones de los productores trigueros (condiciones físicas y ambientales predominantes) para los que la genética pretende incorporar el efecto de la genética del material. En el otro extremo se encuentran localidades como las del norte del Departamento de La Paz (Charazani) donde definitivamente las condiciones físicas y las condiciones ambientales estuvieron muy por debajo de lo óptimo,

incorporándose desafíos relacionados al manejo bajo un sistema de labranza mínima y otros que incidieron en el comportamiento.

La representación estandarizada del rendimiento de las catorce líneas de trigo harinero promediado sobre catorce localidades durante la campaña agrícola 2013-2014 identifica líneas como la 330, seguido de la 337 (INIAF-Totora 2014) como las de comportamiento más promisorio, reflejando las aptitudes genéticas bajo las condiciones de producción de las zonas trigueras representativas.

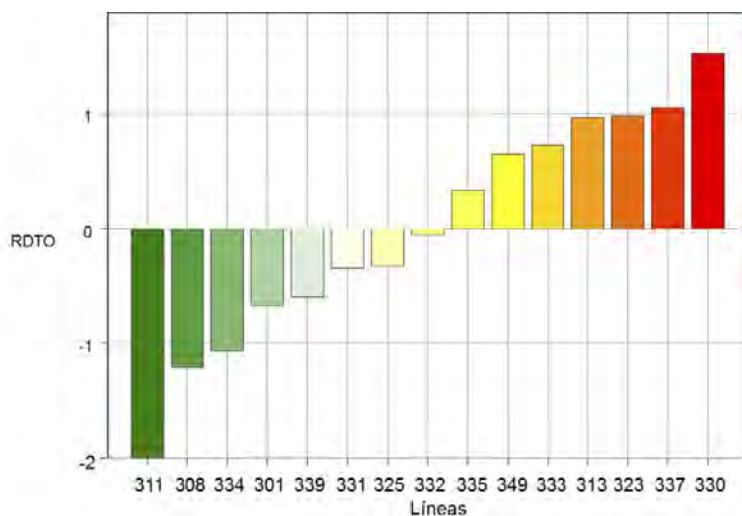


Figura 5. Rendimiento promedio estandarizado para quince líneas élite de trigo harinero evaluadas en catorce localidades durante la campaña agrícola 2013 a 2014.

El análisis de varianza combinado (tabla 7), presenta la probabilidades de “F” para las distintas fuentes de variación consideradas en el estudio. El efecto del genotipo no fue significativo por las características de la población (líneas élite seleccionadas por su máximo potencial productivo en el proceso de avance ge-

neracional). El efecto localidad resulto altamente significativo en términos de la expresión de productividad del material, siendo ésta el reflejo de las características muy distintivas de cada sistema además de la expresión de los factores de producción.

Tabla 7. Análisis de varianza combinado para el rendimiento de quince líneas élite de trigo harinero en catorce localidades durante la campaña agrícola 2013 a 2014.

Fuentes de Variación	GL	SC	CM	Fc	
Localidad	13	1631491822.7	125499370.98	104.68	**
Blq/Localidad	28	33569614.9	1198914.82	4.61	**
Líneas	14	4287910.0	306279.29	1.18	ns
GxA	182	66658920.9	366257.81	1.41	ns
Error	392	102041811.4	260310.74		
Total	629	1838050080.0			

* Sig. Estad. al 5% de probabilidad; ** Sig. Est. al 1% de probabilidad; ns No sig. Est.

Los parámetros de estabilidad estimados de acuerdo al modelo de Eberhart y Russell se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Rendimiento promedio (Kg*ha-1) y parámetros de estabilidad de quince líneas élite de trigo harinero evaluados en catorce localidades durante la campaña agrícola 2013-2014.

ID	GEN	Promedio	Coef. Reg.	DesvReg	OM
7	330	2107.9	1.10	45425.2	1
13	337	2067.2	1.13	18183.9	2
5	323	2061.2	0.98	-52079.6	3
4	313	2059.8	1.07	-34938.1	4
10	333	2039.6	1.01	7275.7	5
15	349	2032.9	0.8	147697.7	6
12	335	2006.1	0.83	20377.7	7
9	332	1973.1	1.02	-52587.4	8
6	325	1949.7	1.12	-14807.1	9
8	331	1948.8	0.95	54231.4	10
14	339	1926.5	1.04	-47909.5	11
1	301	1920.3	0.91	-2006.0	12
11	334	1886.4	0.86	-12960.5	13
2	308	1874.5	1.02	-30704.8	14
3	311	1806.9	1.13	54130.6	15

El estadístico del coeficiente de regresión es muy favorable (coeficiente de regresión cercano a 1.0) a las líneas 313, 333, 332 que según la figura 6 identifica a estas líneas como las de alta

productividad en ambientes limitados. Las estadísticas de estabilidad son también muy favorables para las líneas 337 y 330, pero en este caso con una productividad muy expectable.

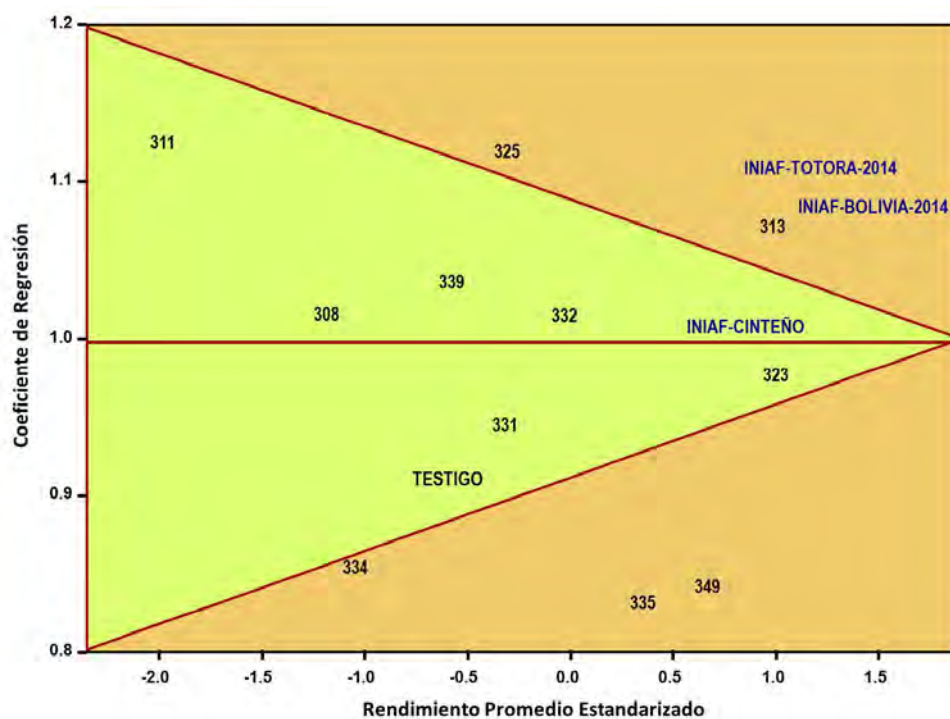


Figura 6. Coeficientes de regresión vs promedio de rendimiento estandarizado para quince líneas élite de trigo harinero evaluadas en catorce localidades durante la campaña agrícola 2013 a 2014.

El análisis AMMI permitió detectar diferencias estadísticamente significativas entre ambientes, genotipos y la interacción genotipo por ambiente para la mayoría de variables consideradas. Efectos altamente significativos para la interacción justifican análisis posterior para la determinar el efecto en el comportamiento de las diferentes líneas a través de los ambientes.

La transformación de las correlaciones con respecto a rendimiento entre líneas así como localidades es explicada en proporción a la variación total explicada, siendo que con esta metodología se explicó el 62% de la variabilidad en el estudio a través de los dos componentes identificados.

La interpretación de los resultados del análisis AMMI se facilita con la representación siguiente (Biplot), donde genotipos y ambientes son posicionados en un mismo espacio. El grado de relación entre ambientes, genotipos y genotipo-ambiente está aproximado por el coseno del ángulo formado entre los vectores que la representan, permitiendo identificar cultivares con comportamientos afines en el sector de localidades específicas. La magnitud de los vectores que identifican a las diferentes líneas y localidades muestra el nivel de su respuesta, identificándose a las localidades de Sipe Sipe, Zudañez, Cruce Incallajta y Kallutaca como muy distintivas e informativas.

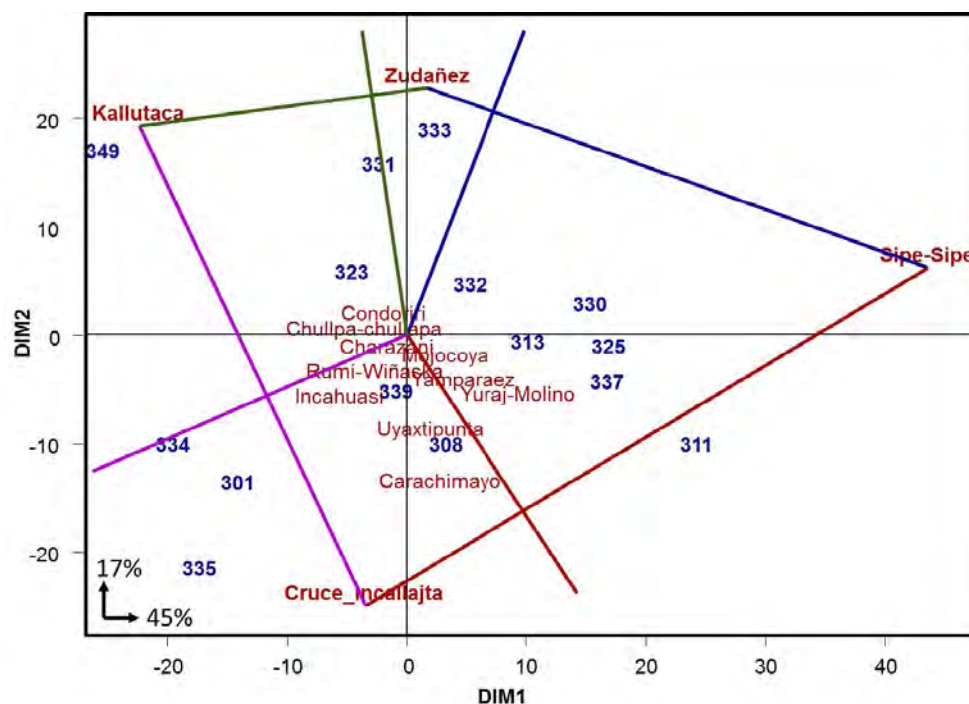


Figura 7. Componente Principal (CP), análisis aditivo de efectos principales y de interacción multiplicativa (AMMI) resumiendo el comportamiento de quince líneas élite de trigo harinero con relación a catorce localidades en la campaña agrícola 2013 a 2014.

El valor agregado del análisis se verifica en la posibilidad de identificar la especificidad en el comportamiento de las líneas con relación a los ambientes, en una suerte de explicación de “quien gana donde”, en esa línea, mencionar el comportamiento destacado de las líneas 333 y 331 en condiciones de la localidad de Zudañez. Genotipos con capacidad de maximización de su aptitud productiva se los identifica en el sector correspondiente a las localidades de Sipe Sipe y Cruce Incallajta. Localidades con limitada capacidad informativa se encuentran cercanas al punto de origen, con ángulos de relación bastante ambivalentes que reflejan su débil capacidad informativa.

Conclusión

Se identifica tres tipos de ambientes con alta capacidad de discriminación de Genotipos, conformada por condiciones de estación experimental, predio de agricultor con condiciones adecuadas de manejo y predio de agricultor con condiciones limitadas, donde las actividades de difusión sobre las ventajas de un adecuado manejo son primordiales.

Se alcanzó a identificar localidades con alta capacidad de discriminación de la interacción genotipo-ambiente, aspecto que permite hacer efectivo el proceso de identificación de materiales promisorios debido a que se tiene la posibilidad de racionalizar localidades con similares condiciones de presión ambiental.

Se identificó líneas élite con adaptabilidad y estabilidad específicas para ambientes con características distintivas en el marco del área triguera tradicional, líneas 333 y 331 con aptitud para zonas trigueras de la zona sur del país. Línea 337 con una adaptación importante para las localidades de valles del departamento de Cochabamba.

El comportamiento agronómico de las 14 líneas élite de trigo harinero en las distintas zonas trigueras del país constituye una muestra fehaciente de la posibilidad de estrechar el margen de diferencia que requiere acortar el país. El comportamiento de 60% de la población con índices productivos muy superiores con relación al cultivar popular con los productores permite avizorar ganancias genéticas muy importantes en pos de aportar con componentes tecnológicos que definitivamente elevaran los índices que en la actualidad imperan.

Referencias citadas

- Abderrahmane, H., Z. Abidine, F. Hamenna, B. Ammar. 2013. Correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*Triticum durum* desf.) under rainfed conditions. *Journal of Agriculture and Sustainability*. 3(2): 122-131.
- Allard R.W., and Bradshaw A.D. 1964. Implications of genotype-environment interactions in applied plant breeding. *Crop Sci.* 4: 03-507.
- Crossa, J. 2012. From genotype $\times$ environment interaction to gene $\times$ environment interaction. *Current Genomics* 13: 225-244.
- Eberhart S.A., Russell W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6:36-40.
- Gauch, H.G., H.-P. Piepho, and P. Annicchiarico. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. *Crop Sci.* 48: 866-889.
- Hussein, M.A., Bjornstad, A., and A.H. Aastveit. 2000. SASG X ESTAB: A SAS program for computing genotype $\times$ environment stability statistics. *Agron. J.* 92: 454-459. *Agron. J.* 92:454-459.
- INIAF, (Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal). 2012. Plan de implementación y avances en el programa nacional de trigo. La Paz-Bolivia. Programa Nacional de Trigo 40 p.
- Kang, M.S., M.G. Balzarini, and J.L.L. Guerra. 2004. Genotype-by-environment interaction. *In* (A.M. Saxton ed.) *Genetic Analysis of Complex Traits Using SAS*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Piepho, H.P., and J. Mohring. 2005. Best Linear unbiased prediction of cultivar effects for subdivided target regions. *Crop Sci.* 45: 1151-1159.
- Poysa V.W., Garton R., Courtney W.H., Metcalf J.G., Muehmer J. 1986. Genotype-environment interactions in processing tomatoes in Ontario. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(2): 293-297.
- Smith, A.B., B.R. Cullis, and R. Thompson. 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. *Journal of Agricultural Science* 143: 449-462.
- Yan, W., and J.B. Holland. 2010. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171: 355-369.
- Yang, R.-C., J. Crossa, P.L. Cornelius, and J. Burgueño. 2009. Biplot analysis of genotype $\times$ environment interaction: proceed with caution. *Crop Sci.* 49: 1564-1576.