



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

**RESPUESTA Y CONTRASTE DE LA ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA
DEL RENDIMIENTO ENTRE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS
(*Triticum aestivum* L.) Y CRISTALINOS (*Triticum durum* L.) PARA
REGIONES DE RIEGO EN MÉXICO**

JORGE LUIS VALENZUELA ANTELO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada **Respuesta y contraste de la estabilidad y consistencia del rendimiento entre genotipos de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) y cristalinos (*Triticum durum* L.) para regiones de riego en México**, realizada por el alumno **Jorge Luis Valenzuela Antelo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

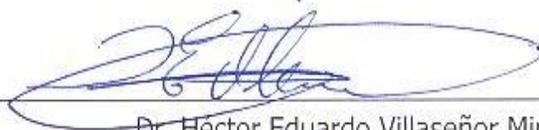
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Ignacio Benítez Riquelme

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir

ASESOR



Dr. Ricardo Lobato Ortiz

ASESOR



Dra. Graciela Bueno Aguilar

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para realizar mis estudios de Postgrado.

Al personal académico del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética y otros postgrados del Colegio de Postgraduados que ayudaron en mi formación como Maestro en Ciencias.

A cada uno de los miembros de mi consejo particular: Dr. Ignacio Benítez Riquelme, Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir, Dr. Ricardo Lobato Ortiz, Dra. Graciela Bueno Aguilar. Por sus consejos y constante apoyo durante la realización de este trabajo, fungiendo como una invaluable guía.

Al Dr. Mateo Vargas Hernández por su colaboración con los análisis estadísticos.

Al Programa Nacional de Trigo de Riego por aportar la información con la cual se realizó este proyecto de investigación.

Al Fondo SAGARPA-CONACYT por el financiamiento de la presente investigación a través del proyecto No. 146788 denominado “Sistema de mejoramiento genético para generar variedades resistentes a royas, de alto rendimiento y alta calidad para una producción sustentable de trigo en México”.

A todos mis compañeros: los Benjamines, Hugo, Juan de Dios, Moisés, los integrantes del Real Genética, y demás amistades que hice durante esta etapa.

DEDICATORIA

A mis padres, Luz Ahideé Antelo Villarreal y Jorge Alberto Valenzuela Parada.

A mi hermano, Andrés Alberto Valenzuela Antelo.

A mi familia.

A mi novia, Irene Elizabeth Sonqui Amador.

A mis amigos.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
I. RESPUESTA Y CONTRASTE DE LA ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA DEL RENDIMIENTO ENTRE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS (<i>Triticum aestivum</i> L.) Y CRISTALINOS (<i>Triticum durum</i> L.) PARA REGIONES DE RIEGO EN MÉXICO	xii
RESUMEN.....	xii
I. RESPONSE AND CONTRAST OF THE STABILITY AND CONSISTENCY OF THE YIELD PERFORMANCE BETWEEN GENOTYPES OF BREAD (<i>Triticum aestivum</i> L.) AND DURUM WHEAT (<i>Triticum durum</i> L.) FOR IRRIGATED PRODUCTION REGIONS IN MEXICO	xiv
ABSTRACT.....	xiv
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Objetivos	3
1.1.2.1. General	3
1.1.2.2. Específicos	3
1.1.3. Hipótesis	4
II. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO ENTRE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS Y CRISTALINOS VARIANDO LA REGIÓN, NIVEL DE RIEGO Y FECHA DE SIEMBRA	5
RESUMEN.....	5
II. YIELD PERFORMANCE RESPONSE BETWEEN BREAD AND DURUM WHEAT VARYING REGION, IRRIGATION LEVEL AND SOWING DATE.....	6
ABSTRACT.....	6
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.2.1 Perspectiva de la producción de trigo cristalino y harinero en México	11
2.2.2. Mejoramiento de trigo México	13
2.2.2.1. Trigo cristalino para riego en México	14

2.2.2.2. Trigo harinero para riego en México	16
2.2.2.3. Rendimientos de trigos cristalinos contra harineros	17
2.2.3. Mejoramiento de trigo de riego enfocado por región	18
2.2.3.1. Mejoramiento de trigo de riego en la región Noroeste	19
2.2.3.2. Mejoramiento de trigo en la región de El Bajío	21
2.2.4. Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento del cultivo	22
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.3.1. Sitios experimentales	24
2.3.2. Genotipos	24
2.3.3. Descripción de los ensayos y análisis de datos	24
2.4. RESULTADOS.....	26
2.4.1. Comparación entre regiones, niveles de riego, especies y genotipos.	26
2.4.2. Análisis por fecha de siembra en Cd. Obregón y Roque	36
2.5. DISCUSIÓN.....	41
2.6. CONCLUSIONES	46
2.7. BIBLIOGRAFÍA	48
III. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA DEL RENDIMIENTO DE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS Y CRISTALINOS PARA SISTEMAS DE RIEGO.....	51
RESUMEN.....	51
III. EVALUATION OF STABILITY AND CONSISTENCY OF YIELD PERFORMANCE OF BREAD AND DURUM WHEAT GENOTYPES FOR IRRIGATION SYSTEMS	52
ABSTRACT.....	52
3.1. INTRODUCCIÓN.....	53
3.2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	55
3.2.1. Concepto de estabilidad de rendimiento	55
3.2.2. Evaluación de la estabilidad y consistencia	57
3.2.3. Métodos multivariados para la evaluación de la Interacción Genotipo por Ambiente	61

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	66
3.3.1. Sitios experimentales	66
3.3.2. Genotipos	66
3.3.3. Descripción de los ensayos y análisis de datos	67
3.4. RESULTADOS.....	70
3.4.1. Estabilidad, consistencia e Interacción Genotipo por Ambiente de rendimientos de trigos cristalinos	70
3.4.2. Estabilidad, consistencia e Interacción Genotipo por Ambiente de rendimientos de trigos harineros	78
3.5. DISCUSIÓN.....	89
3.6. CONCLUSIONES	91
3.6. BIBLIOGRAFÍA	93
IV. DISCUSIÓN GENERAL	95
V. CONCLUSIÓN GENERAL	97
VI. BIBLIOGRAFÍA GENERAL	98
VII. ANEXO.....	99

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Características climatológicas y área potencial de las regiones productoras de trigo de riego	20
Cuadro 1.2. Descripción de los sitios experimentales ubicando el ciclo de cultivo, la región y nivel de riego.	25
Cuadro 1.3. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) contrastando el comportamiento de trigos Cristalinos y harineros para los seis agrupamientos de ambientes.	27
Cuadro 1.4. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) contrastando el comportamiento de trigos Cristalinos y harineros para las tres regiones por nivel de riego.	30
Cuadro 1.5. Contraste de rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de trigo cristalino (C) y harinero (H), en general, por regiones y niveles de riego.	31
Cuadro 1.6. Comparación del rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de trigos cristalinos y harineros de las localidades representativas por región.	32
Cuadro 1.7. Comparación de medias de rendimiento ($ton\ ha^{-1}$) entre genotipos de trigos cristalinos y harineros en el análisis general y por región, en riego normal (N) y reducido (R).	35
Cuadro 1.8. Pérdida porcentual del rendimiento de genotipos de trigos cristalinos y harineros al cambiar de nivel de riego normal a riego reducido en el análisis general y por región.	36
Cuadro 1.9. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) contrastando el comportamiento de trigos cristalinos y harineros en fecha de siembra normal (FN) y tardía (FT) en las localidades de Cd. Obregón y Roque.	37
Cuadro 1.10. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$) contrastando el comportamiento de trigos cristalinos y harineros en las localidades de Cd. Obregón y Roque.	38
Cuadro 1.11. Comparación de rendimientos ($ton\ ha^{-1}$) obtenidos en las dos fechas de siembra de trigo cristalino (C) contra trigo harinero (H) en Cd. Obregón y Roque.	39
Cuadro 1.12. Comparación de rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de genotipos de trigo cristalino y harinero y efecto al cambiar de fecha normal (FN) a fecha tardía (FT) en Cd. Obregón y Roque.	40

Cuadro 2.1. Clasificación de las variedades por sensibilidad y predictibilidad (Márquez y Córdoba 1976).....	62
Cuadro 2.2. Descripción de los sitios experimentales.....	68
Cuadro 2.3. Genotipos utilizados para el análisis de estabilidad y consistencia con su respectivo número.....	69
Cuadro 2.4. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos cristalinos en los agrupamientos general (G), riego normal (N) y reducido (R).....	72
Cuadro 2.5. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos cristalinos en los ambientes de las regiones de El Bajío (B), Noroeste (NO) y Norte (N).....	73
Cuadro 2.6. Categorías del comportamiento de las variedades de trigo cristalino en los seis agrupamientos de ambiente según Márquez y Córdoba (1976).....	74
Cuadro 2.7. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos harineros para los agrupamientos de ambiente: general (G), riego normal (N) y reducido (R).....	80
Cuadro 2.8. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos harineros en los ambientes de las regiones de El Bajío (B), Noroeste (NO) y Norte (N).....	82
Cuadro 2.9. Clasificación de las variedades de trigo harinero en los seis agrupamientos de ambiente según Márquez y Córdoba (1976).....	83
Cuadro 7.1. Descripción de los sitios experimentales ubicando el ciclo de cultivo, la región y nivel de riego.....	99
Cuadro 7.2. Comparación del rendimiento de los ambientes en cada agrupamiento.	100
Cuadro 7.3. Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Cd. Obregón, Los Mochis y Mexicali.	101
Cuadro 7.4. Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Delicias, Río Bravo y Zaragoza.	101
Cuadro 7.5. Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Roque, La Barca y Yanhuitlán.	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Porcentaje del área sembrada de trigo en México por región.....	12
Figura 1.2 Porcentaje de la producción de trigo en México por región.	12
Figura 1.3 Principales regiones productora de trigo de riego en México	19
Figura 1.4 Contraste de rendimientos en riego normal y riego reducido para los genotipos de trigo cristalinos en las localidades más representativas de cada región.	33
Figura 1.5 Contraste de rendimientos en riego normal y riego reducido para los genotipos de trigos harineros en las localidades más representativas de cada región.	33
Figura 1.6 Contraste de rendimientos en riego normal y riego reducido para los genotipos de trigo cristalinos en las localidades de mayor rendimiento de cada región.....	34
Figura 1.7 Contraste de rendimientos en riego normal y riego reducido para los genotipos de trigos harineros en las localidades de mayor rendimiento de cada región.	34
Figura 2.1. Estabilidad estática y dinámica.....	56
Figura 2.2. Interpretación de las variedades en función de su coeficiente de regresión y rendimiento medio de la variedad según Finlay y Wilkinson (1963).....	61
Figura 2.3. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos para el agrupamiento general.....	75
Figura 2.4. Representaciones gráficas de los análisis AMMI para los agrupamientos riego normal (a) y limitado (b) contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos.....	76
Figura 2.5. Representación gráfica del análisis AMMI para el agrupamiento de la región de El Bajío con riego normal, contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos.....	77

Figura 2.6. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos en el análisis de los ambientes de la región del Noroeste.....	79
Figura 2.7. Representaciones gráficas de los análisis AMMI para los agrupamientos riego normal (a) y limitado (b) contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros.....	84
Figura 2.8. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región de El Bajío.....	85
Figura 2.9. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región Noroeste.....	87
Figura 2.10. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región Norte.....	88

I. RESPUESTA Y CONTRASTE DE LA ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA DEL RENDIMIENTO ENTRE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS (*Triticum aestivum* L.) Y CRISTALINOS (*Triticum durum* L.) PARA REGIONES DE RIEGO EN MÉXICO

Jorge Luis Valenzuela Antelo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

Ante la necesidad de abatir el déficit de producción de trigo harinero panificable y aumentar la producción de trigo cristalino, El Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias ha dispuesto una serie de ensayos llamados Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI) en las principales regiones productoras de trigo en México. Estos ensayos tienen como objetivos comparar y contrastar, con base en el rendimiento, la respuesta de los genotipos de ambas especies de trigo, además de evaluar la interacción que estos tienen con los diversos ambientes presentes en el país. Esto con la finalidad de apoyar la selección de genotipos para condiciones de riego de alto rendimiento y que mantengan su rendimiento conforme el cambio ambiental. En esta línea de exploración y uso de la información, se recurrió a la base de datos de 39 experimentos del ENTRI correspondientes a las regiones del Noroeste, Norte y El Bajío en los ciclos invierno-primavera 2012-2013 y 2013-2014, para evaluar el comportamiento de 16 genotipos, ocho de trigo harinero y ocho de trigo cristalino. En las evaluaciones realizadas los ENTRI mostraron ser una importante herramienta en el contraste y comparación entre genotipos de especies, así como para identificar genotipos estables en su rendimiento. Se encontró que el potencial productivo de los genotipos dependió del potencial propio de cada región, siendo la región del Noroeste la de mayor potencial, a pesar de que algunos genotipos interactuaban favorablemente con ciertas regiones. El rendimiento de trigos cristalinos fue generalmente mayor al del harinero. Los niveles de riego y las fechas de siembra tuvieron

un efecto negativo en ambas especies. En cuanto a la comparación dentro de especies, las líneas avanzadas candidatas a liberación de ambas especies se ubicaron en el grupo de mayor rendimiento estadístico, donde también se encontraron las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' para los cristalinos y 'Borlaug 100 F2014' para los harineros; además estos genotipos fueron los más estables en gran parte de los agrupamientos a excepción de 'V12'. Basados en lo anteriormente mencionado, los ENTRI son de vital importancia en la identificación de genotipos elite y estables, su continuidad es primordial a fin combatir el cambio climático, debido a lo cambiante que pueden llegar a ser unas localidades año con año.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., trigos cristalinos vs harineros, trigo de riego, rendimiento de grano, estabilidad, AMMI, SREG.

I. RESPONSE AND CONTRAST OF THE STABILITY AND CONSISTENCY OF THE YIELD PERFORMANCE BETWEEN GENOTYPES OF BREAD (*Triticum aestivum* L.) AND DURUM WHEAT (*Triticum durum* L.) FOR IRRIGATED PRODUCTION REGIONS IN MEXICO

Jorge Luis Valenzuela Antelo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

Given the need to reduce the deficit in production of bread wheat and increase the durum wheat production, the national program of wheat from the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias has arranged a series of essays called national trials of irrigation wheat (ENTRI) in the main wheat production regions of Mexico. These trials have as objective to compare and contrast, based on performance, the response of the genotypes of both species of wheat, as well as evaluate the interaction they have with the different environments spread around the country in order to support the selection of genotypes of high performance and yield stability. In this sense, this study used the data base of database of 39 ENTRI corresponding to regions of the Northwest, North, and El Bajío in the winter-spring cycles 2012-2013 and 2013-2014, to evaluate the performance of 16 genotypes, eight of bread wheat and the same number of durum wheat. In the evaluations the ENTRI proved to be an important tool in contrast and comparison between genotypes of both species, as well as to identify stable genotypes in their performance. The results showed that the productive potential of the genotypes depended on the productive potential of each region, being the region of the Northwest the one with the greatest potential, although some genotypes interacted favorably with other regions. Durum wheat outyielded compared with bread wheat. The effect of sowing dates and irrigation levels had a negative effect on both species. In terms of comparison among species, advanced breeding line candidates to be release of both species were placed in the group of higher statistical performance, where they also found the varieties

'Cirno C2008' and 'Anatoly C2011' for the durum wheat and 'Borlaug 100 F2014' for the bread wheat; These genotypes were also the most stable in most of the groups with the exception of 'V12'. Based on the foregoing, the ENTRI are of vital importance in the identification of elite stable genotypes, its continuity is paramount in order to fight climate change, due to the changing conditions presented in some locations year by year.

Key Words: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., durum wheat vs bread wheat, irrigated wheat, yield, stability, AMMI, SREG.

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.1. Planteamiento del problema

Los trigo harineros (*Triticum aestivum* L.) y cristalinos (*Triticum durum* L.) son cereales de suma importancia para México, particularmente para el consumo humano, la industria de la transformación y la economía del país. En México la producción de trigo ha fluctuado con el paso del tiempo, mas no así su consumo que se incrementa cada año; por consiguiente es primordial alcanzar rendimientos más altos, a fin de lograr la autosuficiencia en materia de trigo harinero panificable y ser más productivos en el caso del trigo cristalino.

La preferencia por la especie de trigo a producir depende de la región, el trigo cristalino prevalece en el Noroeste (Figuroa *et al.*, 2010), mientras que el trigo harinero de gluten suave en El Bajío (Huerta *et al.*, 2011; Solís *et al.*, 2009). La adopción del trigo cristalino en el Noroeste es debido a los altos rendimientos, resistencia al carbón parcial (*Tilletia indica* Mitra) y a la roya de la hoja (*Puccinia triticina* Eriksson), además de la aceptación que este tiene en el mercado internacional y por tener generalmente un mayor precio a la venta que los trigos panificables (Fuentes *et al.*, 2014; Fuentes, 2013). La preferencia del trigo harinero en El Bajío se debe a la cercanía con las plantas procesadoras además de tener mayor demanda (Villaseñor *et al.*, 2011).

En estas dos regiones se realizan la mayor parte de los esfuerzos del mejoramiento genético de trigo en el país, y cada una tiene sus peculiares enfoques. El programa de mejoramiento de trigo para la región Noroeste apunta hacia el desarrollo de variedades de alto rendimiento, ciclo tardío y con gran adaptabilidad para diferentes sistemas de producción y ambientes (Aquino *et al.*, 2008); mientras que en El Bajío

se busca adaptación específica y con atributos principales cómo la precocidad, alto potencial de rendimiento, resistencia al acame y calidad de grano (Huerta *et al.*, 2011). Un común denominador entre ambas regiones es la identificación de genotipos con un uso eficiente del agua.

Los programas de mejoramiento de ambas especies han tenido grandes avances con el paso del tiempo, y sin duda la revolución verde gestada en los años sesenta fue un parteaguas en cuanto al incremento del potencial de rendimiento; sin embargo muy poco esfuerzos han sido dedicados en cuanto a la comparación entre ambas especies. Los pocos antecedentes que se tienen mencionan que en la etapa de la revolución verde, los rendimientos de los trigos harineros eran superiores a los trigos cristalinos en cualquier condición; pero, en la década del 2000-2010, momento donde surgieron las variedades de alto rendimiento de trigos cristalinos, la brecha entre los rendimientos de ambas especies se estrechó (Marti y Slafer 2014). Parte clave de la generación de materiales elite para ambas especies ha sido selección alternada y la evaluación en ensayos multiambientes, ya que de esta manera se desarrollan genotipos de alto rendimiento y resistentes a factores biótico y abióticos, a su vez estos ensayos permiten evaluar la consistencia en el comportamiento de los genotipos, fenómeno conocido como interacción genotipo por ambiente (Braun y Payne, 2013).

En la actualidad el Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias ha dispuesto una serie de ensayos a lo largo del territorio mexicano donde se ponen a prueba una gran cantidad de genotipos en diversas condiciones ambientales. Estos ensayos llamados Ensayos Nacionales de Trigo de Riego tienen como objetivo, evaluar y comparar las líneas avanzadas generadas contra las variedades actuales que conforman los mosaicos

genéticos de las regiones productoras del país. Con la información obtenida a través de estos ensayos, el proceso de selección de una línea candidata a la liberación se ve facilitado, permitiendo de esta manera una renovación y/o actualización de las variedades disponibles para los productores.

1.1.2. Objetivos

1.1.2.1. General

- Comparar la respuesta de genotipos de trigos cristalinos y harineros bajo condiciones de riego normal y limitado en diferentes regiones productoras de México y evaluar la estabilidad y consistencia de los rendimientos.

1.1.2.2. Específicos

- Evaluar la importancia de los ensayos nacionales de trigo de riego.
- Comparar los rendimientos de las regiones productoras de trigo.
- Evaluar los rendimientos de los trigos harineros contra los trigos cristalinos por condición de riego en las diferentes regiones productoras.
- Comparar el rendimiento de las líneas candidatas a liberación contra las variedades actuales en las diferentes productoras regiones por condición de riego y fecha de siembra.
- Comparar la estabilidad y consistencia del rendimiento del trigo cristalino y harinero en los ambientes de prueba.

1.1.3. Hipótesis

- Los ensayos nacionales de trigo de riego son de gran importancia en el contraste del desempeño entre especies, así como en la identificación de las líneas candidatas de mayor rendimiento y estables.
- Los rendimientos más altos serán obtenidos en las regiones del Noroeste y El Bajío.
- El rendimiento del trigo harinero será superior en la región de El Bajío y en las condiciones de riego reducido; mientras que el trigo cristalino será superior en la región norte, noroeste y en las condiciones de riego normal.
- Las líneas avanzadas superaran el rendimiento de las variedades actuales en las diferentes regiones de producción por condición de riego y fecha de siembra.
- Las líneas avanzadas serán más estables y consistentes en su rendimiento que las variedades actuales en ambas especies.

II. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO ENTRE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS Y CRISTALINOS VARIANDO LA REGIÓN, NIVEL DE RIEGO Y FECHA DE SIEMBRA

RESUMEN

Enfatizando la importancia de los Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI), el objetivo del presente estudio fue comparar y contrastar, con base en el rendimiento de grano, la respuesta de ocho genotipos de trigo cristalino y misma cantidad de genotipos de trigo harinero bajo condiciones de riego normal y reducido, sembrados en las principales regiones productoras de trigo de riego en México; ello con el propósito de apoyar la identificación de líneas de trigos candidatas para liberación. Para tal fin, se recurrió a la base de datos de 39 réplicas del ENTRI del Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, establecidos en las regiones del Noroeste, Norte y El Bajío en los ciclos invierno-primavera 2012-2013 y 2013-2014. En los análisis realizados, considerando los diferentes factores de variación antes citados, se obtuvo que el rendimiento de grano de ambas especies dependió del potencial productivo de las regiones productoras; los rendimientos más altos fueron obtenidos en el Noroeste, seguido por El Bajío y finalmente el Norte. En estas regiones, el rendimiento de los trigos cristalinos fue estadísticamente más alto al de los harineros con las excepciones del Noroeste y El Bajío en riego reducido. Respecto a niveles de riego, el limitar el riego en la etapa de llenado de grano, afectó negativamente y en forma similar el rendimiento en ambas especies. La fecha de siembra tardía tuvo un efecto detrimental en los genotipos de ambas especies; sin embargo fue mayor en trigos cristalinos. Las líneas avanzadas candidatas a liberación de ambas especies se ubicaron en el grupo de mayor rendimiento estadístico, donde también se encontraron las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' para los cristalinos y 'Borlaug 100 F2014' para los harineros.

Palabras Claves: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., trigos cristalinos vs harineros, trigos de riego, rendimiento de grano, regiones productoras de trigo de riego

II. YIELD PERFORMANCE RESPONSE BETWEEN BREAD AND DURUM WHEAT VARYING REGION, IRRIGATION LEVEL AND SOWING DATE

ABSTRACT

Highlighting the importance of the national trials for wheat under irrigation conditions (ENTRI), the objective of the present study was to compare and contrast, based on grain yield, the performance of eight genotypes of durum and similar number of genotypes of bread wheat under well-watered and reduced irrigation conditions, these genotypes were planted in the main regions under irrigation in Mexico; this was in order to support the identification of lines to be released. For this reason, this study used the database of 39 ENTRI of the national program of wheat from the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, corresponding to the Northwest, North and The Bajío regions during the winter-spring crop cycles 2012-2013 and 2013-2014. Analyses performed, considering the different factors of variation cited above, show that durum and bread wheat grain yield depended on the productive potential of the study regions; the highest yields were obtained in the Northwest, followed by The Bajío and finally in the North. In these regions, the performance of durum wheats was statistically higher to the bread wheats; the exceptions were the regions of the Northwest and The Bajío environments under reduced irrigation. Regarding the levels of irrigation, limited irrigation at grain filling stage, affected negatively and significantly the grain yield of both species in the same proportion. The late sowing date had a significant and detrimental effect on the performance of the genotypes of bread and durum wheat; however, it had a higher impact on durum wheat. Candidate advanced breeding lines both of durum and bread wheats were in the group of higher statistical performance, where it was also found that the varieties 'Cirno C2008', 'Anatoly C2011' for the durum wheat and 'Borlaug 100 F2014' for the bread wheat had a higher statistical performance.

Key words: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., durum wheat vs bread wheat; irrigated wheat, grain yield, irrigated wheat production regions.

2.1. INTRODUCCIÓN

Los trigo harineros (*Triticum aestivum L.*) y cristalinos (*Triticum durum L.*) son cereales de suma importancia para México, particularmente para el consumo humano, la industria de la transformación y la economía del país. La mayor parte de la producción de este cereal se concentra en la región Noroeste y El Bajío mexicano con 55 y 28 %, respectivamente (OEIDRUS, 2014). Su principal demandante es la industria harinera, debido a que el trigo para que sea posible consumirlo es necesario que pase por un proceso de transformación de la molienda al horneado o hervido. El trigo cristalino prevalece en la región Noroeste (Figuroa-López *et al.*, 2010), mientras que el trigo harinero en el Bajío (Huerta *et al.*, 2011; Solís Moya *et al.*, 2009). La adopción del trigo cristalino en el Noroeste es debido a los altos rendimientos, resistencia al carbón parcial (*Tilletia indica Mitra*) y a la roya de la hoja (*Puccinia triticina Eriksson*), además de la aceptación que éste tiene en el mercado internacional y por tener generalmente un mayor precio a la venta que los trigos panificables (Fuentes , 2013; Fuentes *et al.*, 2014). La preferencia del trigo harinero en El Bajío se debe a la cercanía con las plantas procesadoras, además de tener mayor demanda (Villaseñor *et al.*, 2011). Aunque la mayor parte de la producción se concentra en El Noroeste y Bajío, las regiones de trigo de temporal tienen una importante proyección (Villaseñor *et al.*, 2011).

La producción de trigo ha fluctuado con el paso del tiempo, mas no así su consumo que se incrementa cada año; por consiguiente es primordial alcanzar rendimientos más altos, a fin de ser más productivos y lograr la autosuficiencia. La demanda de ambos cereales en el país es muy contrastante, el trigo cristalino tiene una sobreproducción y su excedente es exportado a Europa. En contraste se tiene un déficit muy alto de trigo harinero, teniéndose que recurrir a la importación (Villaseñor

et al., 2011). Así por ejemplo, en el año 2014 México produjo 3, 490,457.73 toneladas de trigo, de las cuales el 60 % fue de trigo cristalino y del que se exportó aproximadamente el 62 %; el resto de la producción correspondió a trigo harinero que se destinó a consumo humano (SIAP, 2015). El aumento de las importaciones de trigo harinero panificable o también conocido como trigo de Gluten fuerte o del Grupo 1, es atribuible que las variedades de trigo cristalino en las áreas irrigadas son más productiva que las harineras, de tal manera que los primeros son más rentables para el productor.

Para llegar a ser autosustentables en materia de alimentación es necesario aumentar la producción de grano de trigo por superficie. El aumento en la ganancia genética del potencial de rendimiento es una de las formas para alcanzar este objetivo, sin embargo es imprescindible tener en cuenta la resistencia a los factores bióticos y abióticos (Mergoum *et al.*, 2009; Pfeiffer *et al.*, 2001); y son esas consideraciones las que los programas de mejoramiento actualmente tienen dentro de sus objetivos (Huerta *et al.*, 2011; Mergoum *et al.*, 2009). Respecto a los factores abióticos, una problemática recurrente en el fitomejoramiento es el cambio climático, muestra de ello son las condiciones climatológicas atípicas como los golpes de calor y/o heladas; las sequías son más severas, como la del ciclo 2011-2012, que fue la sequía más intensa del país de los últimos 50 años, y la región Norte del país la más afectada (INECC-SEMARNAT, 2012). Actualmente los factores bióticos que son de los principales problemas en la producción del trigo son las enfermedades fungosas. La roya amarilla (*Puccinia striiformis f. sp. tritici*), de la hoja (*Puccinia triticina*) y del tallo (*Puccinia graminis f. sp. tritici*) son las enfermedades más destructivas del trigo y las que más pérdidas han causado en el mundo en los últimos años (Singh *et al.*, 2005; Zwer y Qualset, 1994).

Para generar variedades elite es indispensable conducir la selección y la evaluación de los nuevos genotipos en ensayos multiambientes, con la intención de identificar genotipos de buen desempeño en diversos ambientes y así utilizarlos como progenitores, a fin de ir acumulando alelos favorables (Braun y Payne, 2013). Los programas involucrados en el fitomejoramiento, ante la diversidad regional, de potenciales de cada especie, mercado de importaciones y exportaciones, necesidades de la industria y repuesta a factores abióticos y bióticos requeridos en las variedades liberadas en cada región, se ven en la necesidad de dedicar una gran cantidad de recursos para respaldar el comportamiento de las futuras variedades; creando en cada caso ensayos exhaustivos regionales, nacionales e incluso internacionales que se repiten por varios años. Producto de tales ensayos, se generan una gran cantidad de información sobre el comportamiento de los materiales evaluados en regiones y años que se utilizan para respaldar el desempeño de una línea candidata a variedad. En la bitácora de los Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), existe una gran cantidad de datos sobre el comportamiento de líneas y variedades de trigos harineros y cristalinos, por regiones, años, niveles de riego, fechas de siembra, entre otros factores, que pueden ser utilizados para caracterizar, con base en el comportamiento de los genotipos: regiones geográficas, años, efectos de la temperatura y cambio climático, comparación del comportamiento entre trigos cristalinos y harineros, etc. En esta línea de exploración y uso de la información presente en bitácoras, se recurrió a la base de datos de 16 genotipos de trigos cristalinos y harineros en que formaron los Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI) del Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, que se probaron durante los ciclos

O-2012-13 y 2013-14 en 39 condiciones de producción distribuidas en las tres principales regiones productoras de riego del país: Noroeste (Baja California Norte, Sonora y Sinaloa), Norte (Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas) y El Bajío (Guanajuato, Jalisco y Oaxaca). El objetivo del presente estudio fue comparar y contrastar, con base en el rendimiento de grano, la respuesta de ocho genotipos de trigo cristalino y ocho de trigo harinero bajo condiciones de riego normal y reducido, sembrados en fechas de siembra normal y tardía en las tres diferentes regiones productoras de trigo de riego en México; ello con el propósito de conocer el comportamiento de cada especie y valorar la importancia de los ensayos nacionales para identificar líneas superiores para su liberación como nuevas variedades.

2.2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.2.1 Perspectiva de la producción de trigo cristalino y harinero en México

La producción de trigo en México en el ciclo agrícola 2012/2013 fue de 3.4 millones de toneladas en un total de 683,000 ha., donde los estados de Sonora y Baja California Norte fueron los mayores productores con el 62 y 15 % de la producción total, respectivamente. En este ciclo, el estado de Guanajuato tuvo una afectación en su producción al tener un 45 % de su cosecha como siniestrada por problemas climáticos; de igual manera San Luis Potosí, Oaxaca, Michoacán y Nuevo León también vieron mermada su producción (Fuentes, 2013).

La FAO recomienda que el 75 % de los alimentos de un país se produzcan localmente; sin embargo, en el caso del trigo en México, se satisface menos del 50 % de la demanda estimada en 6.8 millones de toneladas. Para contrarrestar la situación deficitaria del trigo panificable ha sido necesaria la importación, principalmente de los Estados Unidos, Canadá, Francia y Rusia. En el 2013 se importaron 4.2 millones de toneladas, en su gran mayoría proveniente de los Estados Unidos (Fuentes, 2013).

El trigo cristalino tiene como objetivo principal satisfacer la demanda local para consumo humano, en segundo término está la alimentación animal y en un tercero la exportación hacia países que lo demanden. En 2013 se exportó 733 mil toneladas de trigo cristalino a los países de Argelia (46% del volumen exportado), Turquía (24 %), Libia (12 %), Italia (8 %) Guatemala (5 %), principalmente (Fuentes, 2013).

En el 2014 se aumentó el área de siembra a 713,032ha., lo que llevó a un aumento en la producción nacional, alcanzándose 3.66 millones de toneladas. De igual manera los estados de Sonora y Baja California Norte fueron los de mayor aportación a la producción con 49.78 y 14.18 % respectivamente, además fueron los estados con mayor área destinada a este cultivo con 42.89 y 11.88 % respectivamente (SIAP,

2015). De las regiones productoras (Figura 1.1), destaca el Noroeste con la mayor área de siembra para el cultivo de trigo, seguida la del Bajío y por último el Norte; el mismo patrón es para el porcentaje de producción (Figura 1.2) (SIAP, 2015).

El precio que alcanza el trigo en el mercado, al igual que su producción, es muy variable año con año e inclusive por estado (SIAP, 2015). En el ciclo 2009/2010 el trigo cristalino y suave eran pagados en \$2,673 y \$2,726 pesos por tonelada y para el ciclo 2012/2013 \$3,545 por tonelada el trigo cristalino y \$3,541 el trigo suave (Fuentes Pochat, 2013).

Porcentaje del área sembrada

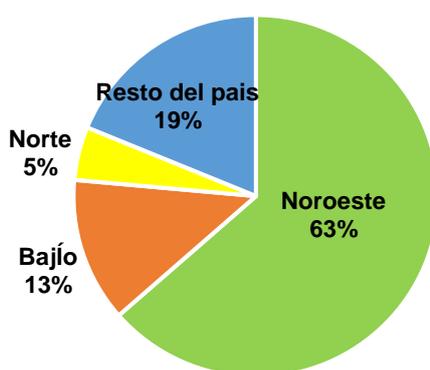


Figura 1.1. Porcentaje del área sembrada de trigo en México por región.

Porcentaje de producción

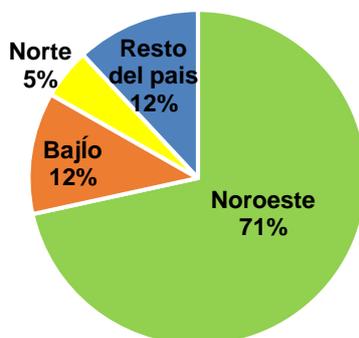


Figura 1.2. Porcentaje de la producción de trigo en México por región.

2.2.2. Mejoramiento de trigo México

El trigo llegó a México proveniente de España, introducido durante la conquista por los frailes jesuitas; estos eran una mezcla de plantas con diferentes características, a partir de los cuales con el paso del tiempo los productores iban seleccionando las mejores hasta “acriollarlos” y tener variedades para cada condición de siembra (Villaseñor, 2000). La demanda de este cultivo comenzó a aumentar y dichas variedades no eran suficientemente productivas como para cubrir las necesidades, por lo que se introdujo en los años 30 del siglo pasado, material proveniente de Estados Unidos, Argentina, Canadá, Italia y España. El esquema de mejoramiento que se utilizó consistía en evaluar y caracterizar los materiales introducidos como mínimo por tres ciclos agrícolas, para luego los mejores, utilizarlos como progenitores en cruces con los nativos, debido a que los introducidos de habito invernal eran pastos y los de primavera eran afectadas por roya del tallo (Villaseñor, 2000).

La llegada del Dr. Norman Borlaug a México que junto con el recién constituido programa de mejoramiento genético realizaron cruzamientos en 1945 que dieron origen a las variedades mexicanas llamadas ‘Yaqui 48’, ‘Mayo 48’ y ‘Kentana’ 48, las cuales fueron recombinadas con nuevo germoplasma para conseguir cerca de 15 nuevas variedades para 1955 (Villaseñor, 2000).

Una de las Piezas claves del mejoramiento genético fue el alternar ambientes contrastantes como lo son Valle del Yaqui y el Valle de Toluca. El Valle del Yaqui tiene un clima seco y condiciones de riego; se encuentra a una altitud de 30 msnm, el ciclo de cultivo va desde noviembre a abril y es excelente para seleccionar para alto potencial de rendimiento, roya de la hoja y tallo, sequía y calor. El Valle de Toluca se encuentra a una altitud de 2650 msnm, se cultiva de mayo a octubre, periodo que concentra una precipitación de 800 mm y es clave para identificar materiales

resistentes a roya amarilla, fusariosis (FHB) y otras enfermedades foliares (Huerta *et al.*, 2011).

La alternancia de ambientes con diferentes regímenes de fotoperiodo, latitud y altitud (Borlaug, 1969), permitió que se obtuvieran variedades de amplia adaptación en diversas partes del mundo, básicamente por la expresión de los genes *PpD1* y *PpD2* que otorgan insensibilidad al fotoperiodo (Rajaram, 1995). Otro gran acierto del programa, fue la de incorporar el gen del enanismo *Norin 10* a las variedades anteriores a 1962, que altas y cultivadas en terrenos favorables, tenían problemas de acame (Villarreal, 1995; Villaseñor, 2000). Los genotipos desarrollados durante la revolución verde fueron probados en África y Asia con resultados satisfactorios (Braun y Payne, 2013).

A partir de los años 80, El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), comenzó a trabajar con tolerancia a sequía y altas temperaturas con la estrategia de combinar germoplasma con tolerancia a estrés con el de alto desempeño en el rendimiento y resistencia a enfermedades, aprovechando que no hay correlación entre el alto rendimiento con adaptación a la sequía, calor y presencia de suelos con aluminio (Kohli *et al.*, 2001); por consiguiente se crearon genotipos en donde era posible acumular caracteres positivos de adaptabilidad. Actualmente el CIMMYT busca generar genotipos para los diferentes mega-ambientes alrededor del mundo (Braun y Payne, 2013).

2.2.2.1. Trigo cristalino para riego en México

El trigo cristalino mexicano para condiciones de riego se divide en dos razas principales: el Barrigón Yaqui para el Noroeste y Barrigón Bajío para el centro del país. En los años 50 se realizaron los primeros esfuerzos en esta especie con la introducción de los genes de enanismo e insensibilidad al fotoperiodo (Huerta *et al.*,

2011). Los primeros genotipos obtenidos a principios de los años 60, superaron el potencial de rendimiento a los genotipos de gran tamaño (Brajcich *et al.*, 1987); en especial, la variedad 'Oviachic C65', primer trigo semi-enano e insensible al fotoperiodo, el cual produjo en algunos lugares de México y otras partes del mundo el mismo rendimiento que el mejor trigo harinero de esa época, la variedad 'INIA F66' (Huerta *et al.*, 2011). En esta época también se mejoró la fertilidad en la espiga (Brajcich *et al.*, 1987).

Con 'Altar C84', el rendimiento potencial del trigo cristalino, era superior al de los mejores trigos harineros y triticales en prueba por lo menos en la región Noroeste (Brajcich *et al.*, 1987). En los años 80 y en la región Noroeste el área de siembra de trigo harinero era superior a la del trigo cristalino, 80 y 20 % respectivamente. Sin embargo y por el carbón parcial que afectó al trigo harinero, el porcentaje de área sembrada se invirtió. En el 2001 se generó la variedad de trigo cristalino más rendidora generada en México hasta el momento llamada 'Atil C2001', que una cepa nueva de roya de la hoja afectó su productividad, al igual que al 80 % del germoplasma de trigo cristalino disponible en México. Como medida de emergencia salió 'Jupare C2001', la cual presentó resistencia a roya de la hoja (Huerta *et al.*, 2011).

Actualmente los programas de mejoramiento de trigo cristalino tienen dentro de sus principales objetivos incorporar en nuevas variedades: resistencia durable a roya de la hoja, alto potencial de rendimiento, buena calidad industrial, pigmento amarillo y alto contenido de proteína (Huerta *et al.*, 2011).

2.2.2.2. Trigo harinero para riego en México

Las variedades introducidas 'Mentana', 'Marroqui' y 'Gabo', primeras variedades registradas en México, fue el germoplasma que retrocruzado en con variedades locales, dieron origen las "primeras" variedades mexicanas: 'Yaqui 48', 'Mayo 48' y 'Kentana 48' (Villarreal, 1995; Villaseñor, 2000), a las que más tarde, a mediados de los años 50, se les introdujeron los genes de enanismo *Rht1* y *Rht 2* (Villarreal, 1995).

A finales de los años 60, se incorporaron los trigos facultativos de invierno, con el objetivo de transferir al germoplasma de primavera, genes de resistencia a enfermedades foliares, de tolerancia a calor, resistencia al frío y a la sequía; cualidades que se conjugaron en las nuevas líneas (Villarreal, 1995).

En 1973 el CIMMYT en colaboración con fitomejoradores brasileños, lograron combinar resistencia a suelos ácidos y alto potencial de rendimiento; tal colaboración también contribuyó a ampliar el espectro de resistencia a *Septoria tritici*, *S. nodorum*, *Helminthosporium sativum*, *Helminthosporium tritici-repentis*, *Xanthomonas campestris* pv. *Undulosa*, FHB, BYDV y *Tilletia indica* (Villarreal, 1995). En 1988 se realizó mejoramiento alternado en colaboración con la academia china de ciencias agrícolas, el objetivo que tenían era combinar resistencia a roya, fusariosis de la espiga y alto potencial de rendimiento.

Se realizaron cruzamientos con centeno (*Secale cereale*) con el objetivo de agregar genes de resistencia a las royas, además se aumentó el rendimiento (Villarreal, 1995). En la misma dirección, se crearon hexaploides sintéticos utilizando *Aegiplos tauschii*, *Ae. ventricosa*, *Thinopyrum spp.* y otros cereales, dando buenos resultados (Huerta et al., 2011).

Los programas actuales de mejoramiento de trigo harinero en México generalmente se enfocan en aumentar el rendimiento potencial, resistencia durable a

enfermedades, mayor eficiencia en la asimilación de nutrientes, resistencia a sequía, precocidad y calidad industrial (Huerta *et al.*, 2011). La resistencia a enfermedades es una manera amigable de evitar pérdidas de rendimiento por enfermedades en comparación con el uso de pesticidas; la calidad de grano como una forma de evitar la importación y los bajos niveles de proteína; la resistencia a sequía, por la cada vez menor disponibilidad de agua en las zonas de riego; etc. (Huerta *et al.*, 2011).

2.2.2.3. Rendimientos de trigos cristalinos contra harineros

No se han realizado muchos trabajos donde se compare el desempeño de trigos cristalinos y harineros, los pocos resultados obtenidos han llegado a conclusiones inconsistentes debido a la carencia de un número amplio de ambientes experimentales o que los genotipos utilizados no son para el mismo propósito; dígame que se comparan genotipos con alto potencial de rendimiento contra genotipos con características de resistencia a enfermedades o calidad de grano. (Marti y Slafer 2014). Marti y Slafer (2014) encontraron que el rendimiento de trigo cristalino es superior en condiciones más favorables (ambientes de alto rendimiento), mientras que el trigo harinero tenía mejor desempeño en las condiciones de estrés hídrico. Singh *et al.* (2001) en un estudio de rendimiento de grano de isoclinas de trigo cristalino y harinero llegaron a las mismas conclusiones. Marti y Slafer (2014) evaluaron el avance del mejoramiento genético en ambas especies en el periodo 1960-2010; encontraron que en la década de 1960-1970 y gracias a la revolución verde, los trigos harineros mostraban tener un mejor desempeño en cualquier condición; sin embargo, encontraron que en la década de 2000-2010, que el trigo cristalino presentaba mejor potencial de rendimiento; dichos autores mencionan que se evidencia la intensa selección de trigos harineros antes y después de la revolución verde; de esta manera se demuestra que el mejoramiento de trigo cristalino ha sido notablemente más

efectivo que el de los harineros en las últimas décadas; inclusive existe evidencia que en 1969 'Oviachic C65' ya tenía rendimientos similares y algunas veces superiores a la variedad 'INIA F66', el mejor trigo harinero de esa época (Huerta *et al.*, 2011). Posteriormente los trigos cristalinos serían más rendidores que los harineros condiciones favorables (Brajcich *et al.*, 1987). En déficit hídricos, por el contrario el trigo harinero rinde 24 % más que el trigo cristalino (Mellado, 1991), evidenciando que el trigo cristalino tiene mayor afectación por estrés que el trigo harinero.

2.2.3. Mejoramiento de trigo de riego enfocado por región

México es un país mega-diverso debido a que cuenta amplia gama de ambientes con diferentes condiciones edáficas y climatológicas (Muñoz, 2005). La superficie arable es cercana a las 30 millones de hectáreas, de las que 600,000 ha. son de trigo de riego con un rendimiento promedio de 6 t ha⁻¹ (Huerta *et al.*, 2011). Las principales regiones productoras trigo de riego están localizadas en el centro (El Bajío), Norte y Noroeste (Figura 1.3). Estas regiones tienen en común al menos cuatro características relevantes durante el ciclo de cultivo: a) el ciclo del cultivo comienza en los meses de noviembre/diciembre y termina con la cosecha en abril/mayo; b) las temperaturas en los meses de diciembre y enero son relativamente bajas (<12°C); c) las precipitaciones durante el ciclo del cultivo son prácticamente insignificantes; y d) la superficie sembrada está en función de la disponibilidad de agua que se tiene para riego (Huerta *et al.*, 2011). Las principales diferencias entre estas regiones, además de su ubicación geográfica, radican en sus diferentes tipos de clima, altitud, diferencial de enfermedades, entre otros factores (Cuadro 1.1). El mejoramiento de trigo en el país tiene dos enfoques, para el Noroeste y para El Bajío, cada uno con sus respectivas peculiaridades.



Figura 1.3. Principales regiones productora de trigo de riego en México.

2.2.3.1. Mejoramiento de trigo de riego en la región Noroeste

El programa mejoramiento de trigo para la región Noroeste apunta hacia el desarrollo de variedades de alto rendimiento, ciclo tardío y con gran adaptabilidad para diferentes sistemas de producción y ambientes (Aquino *et al.*, 2008). Mediante la introducción de germoplasma de diferentes partes del mundo en un principio, el cruzamiento, la recombinación y la selección de recombinantes en diferentes ambientes ha sido la estrategia más exitosa para esta región (Huerta *et al.*, 2011).

Se suma en el aumento de la diversidad genética, el cruzamiento con otras especies compatibles con *Triticum*, como el diploide *Aegiplos tauschii*, qué cruzado con trigo cristalino genera hexaploides sintéticos. El material generado, fue posteriormente cruzado con trigos harineros, lo que llevó a un aumento en el rendimiento del orden del 30% además de una mejor respuesta contra ciertos patógenos. Hubo otros casos exitosos, *Ae. venticrosa* que mejoró la resistencia contra

Helminthosporim sativum, *Fusarium spp.*, roya de la hoja y amarilla, y *septoria tritici*.

Con el uso *Thinopyrum spp.* se logró un aumento en el rendimiento potencial (Singh *et al.*, 1998).

Cuadro 1.1. Características climatológicas y área potencial de las regiones productoras de trigo de riego (Huerta *et al.*, 2011).

Región	Estados	Altitud (m.s.n.m)	Precipitación (mm)*	Clima	Factores limitantes	Área potencial (ha)
Noroeste	Baja California	>50	28	Árido	<i>Puccinia triticina</i> , <i>P. striiformis</i> , <i>Tilletia indica</i> , sequía, altas temperaturas durante el llenado de grano, costos de producción.	800,000
	Norte, Sonora y Sinaloa					
	Guanajuato, Michoacán y Jalisco					
El Bajío		1500 a 1800	55	Semi-árido y cálido	<i>P. triticina</i> , <i>P. striiformis</i> , sequía y altos costos de producción	250,000
Norte	Chihuahua, Coahuila y Nuevo León	300 a 1100	80	Semi-árido	<i>P. triticina</i> , sequía, altas temperaturas durante el llenado de grano y altos costos de producción.	100,000

Otro enfoque en esta región es la sequía, debido al efecto que tiene esta condición en el desarrollo y productividad del cultivo. Para exponer la importancia de la sequía vale la pena comentar lo ocurrido durante el periodo 1995-2008 en el Valle del Yaqui, México, donde la asignación de volumen de agua por hectárea se vio reducida

fuertemente, inclusive en el 2003 no se realizó asignación de agua para riego, dejándose de sembrar 180,000 ha (Cortés *et al.*, 2011). Esto fue un gran problema para la economía de la región, ya que depende fuertemente de la agricultura.

El mejoramiento que se realiza en El Noroeste no sólo es estratégico para México ya que el material generado es probado por el CIMMYT en coordinación con otras instituciones en diferentes lugares alrededor del mundo. El CIMMYT dentro de su ideología, considera que genotipos de amplia adaptación a una extensa gama de ambientes es la solución para afrontar los cambios en el clima que ocurren en un lugar a través de los años o dentro del mismo campo agrícola de un productor (Braun y Payne, 2013). Es por esto que la adaptabilidad es uno de los principales objetivos junto con el alto rendimiento potencia, tolerancia a sequía, alto contenido de proteína, enfermedades, entre otros.

2.2.3.2. Mejoramiento de trigo en la región de El Bajío

El mejoramiento en la región de El Bajío es menos intensivo, mientras que en el Noroeste se busca generar variedades que sobresalgan en otros ambientes similares, llámense macroambientes, en El Bajío el enfoque es hacia la adaptación específica. Para ilustrar la estrategia utilizada, en el periodo que comprende 1970-1990 la evaluación de germoplasma sólo se realizó en Roque, Guanajuato, lo que provocó en la generación de variedades con un muy alto nivel de adaptación (Huerta *et al.*, 2011). Los atributos principales que se buscan en este lugar son la precocidad, alto potencial de rendimiento, resistencia al acame y calidad de grano (Huerta *et al.*, 2011). Las bases genéticas utilizadas en este programa de mejoramiento, al igual que en El Noroeste, son los trigos generados durante la revolución verde. Las líneas generadas mediante cruzamiento entre las líneas parentales locales formaron el germoplasma genético principal, el cual también tiene buena combinación con el generado en el

Noroeste y han dado origen a variedades con alto potencial de rendimiento y precoces. Últimamente la estrategia de mejoramiento alternado limitada entre selección en sitios de riego reducido durante el ciclo de invierno y condiciones de temporal en el verano ha permitido incorporar resistencia a roya y tolerancia a sequía (Huerta *et al.*, 2011).

2.2.4. Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento del cultivo

Uno de los principales problemas de realizar las siembras de trigo posterior a las fechas recomendadas son las altas temperaturas en las etapas terminales del cultivo. Por ejemplo, en el Valle del Yaqui en el ciclo 2003-2004, la temperatura durante el desarrollo del cultivo fue favorable; sin embargo, en la etapa inicial a intermedia de llenado de grano se presentó una oleada de calor, que asociada a las restricciones de agua redujeron el rendimiento potencial del cultivo (Félix *et al.*, 2009). Estos mismos autores encontraron que las siembras realizadas durante la primera quincena de enero tienen una pérdida de rendimiento de grano de hasta un 28 % respecto a los sembrados entre el 15-30 de noviembre. Estos estudios atribuyeron la pérdida de rendimiento a las altas temperaturas que afectaron a los cultivares sembrados en fechas más tardías, los cuales acortaron la madurez fisiológica provocando poca formación de espiguillas con grano pequeño.

En otras regiones del país han llegado a conclusiones similares, por ejemplo en El Bajío, Solís y Díaz de León (2001) encontraron que al comparar fechas tempranas de siembra (1 diciembre) con fechas tardías (15 enero) el rendimiento bajo significativamente de 6519 ton ha⁻¹ a 5127 ton ha⁻¹ y respectivamente. De igual manera Urbina y Solís (1991) analizaron los comportamientos de 3 variedades de trigo harinero en el Bajío en diferentes fechas de siembra; concluyen que la siembra

en fechas tardías (15 de enero), reducen significativamente el rendimiento de grano respecto a las fechas tempranas.

Se han hecho estudios para poder cuantificar la magnitud del efecto del calor en el rendimiento. En etapas terminales del ciclo el rendimiento de trigo se ve disminuido hasta en un 4 % por cada grado centígrado que aumenta la temperatura media al acortarse el estadio de llenado de grano (Stapper y Fischer, 1990). Los efectos negativos por altas temperaturas comienzan cuando temperatura máximas superiores a los 32°C se presentan en periodos de 1-4 días consecutivo (Fischer, 2011).

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Sitios experimentales

Los experimentos se establecieron en 39 ambientes en los ciclos de invierno-primavera 2012-2013 y 2013-2014, agrupados en tres regiones trigueras; Noroeste, Norte y El Bajío, cada una con tres localidades (Cuadro 1.2). Yanhuitlán, Oax., fue agregada a la región de El Bajío para hacer más homogéneos la cantidad de localidades por región. Los experimentos se establecieron bajo diferentes situaciones tales como: niveles de riego, normal y reducido; fechas de siembra; y no en todos los casos incluyeron ambos ciclos de evaluación como en Yanhuitlán, Oax., en La Barca, Jal. y en Delicias, Chih. El diseño experimental utilizado en estos sitios fue bloques al azar. El nivel de riego normal consistió en cuatro riegos de auxilio durante el ciclo de cultivo y el nivel de riego reducido o reducido de tres, eliminando el último riego en la etapa de llenado de grano.

2.3.2. Genotipos

En cada sitio se evaluaron 16 genotipos, ocho de trigo harinero: 'Tacupeto F2001', 'Kronstad F2004', 'Roelfs F2007', 'Urbina S2007', 'Villa Juárez F2009', 'Borlaug 100 F2014', y las líneas avanzadas 'V11' y 'V13', y ocho de trigo cristalino: 'Gema C2004', 'Cevy Oro C2008', 'Cirno C2008', 'Movas C2009', 'Sáwali Oro C2008', 'Anatoly C2011' y las líneas avanzadas 'V12' y 'V15'.

2.3.3. Descripción de los ensayos y análisis de datos

Las siembras y manejos agronómicos se realizaron conforme a las recomendaciones del INIFAP propias de cada localidad, a excepción de la segunda fecha de siembra que se utilizó como otro factor de variación en Cd. Obregón y Roque.

En cada sitio, la variable evaluada fue el rendimiento de grano expresado en toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) a partir de la cosecha de cada parcela experimental.

Se realizaron los análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias utilizando la diferencia significativa honesta (DSH) de Tukey ($p \leq 0.05$) para seis agrupamientos: general que involucró a los 39 ambientes; para ambientes de riego normal; para ambientes de riego reducido; por región: El Noroeste, El Norte y El Bajío; y por fecha de siembra, contrastando en cada caso a las dos especies. Se estimaron los contrastes del cambio del rendimiento, en porcentaje y para ambas especies, entre riego normal y reducido, y entre fechas de siembra.

Cuadro 1.2. Descripción de los sitios experimentales ubicando el ciclo de cultivo, la región y nivel de riego.

Región	Ciclos agrícolas	Localidad (# ambientes)	Niveles de riego	Fechas de siembra
El Bajío	2012-13	Roque, Gto. (8)	RN, RR	FN, FT
	2013-14		RN, RR	FN, FT
	2012-13	La Barca, Jal.(3)	RN, RR	FN
	2013-14		RN	FN
	2013-14	Yanhuitlán, Oax.(2)	RN, RR	FN
Noroeste	2012-13	Cd. Obregón, Son.(8)	RN, RR	FN, FT
	2013-14		RN, RR	FN, FT
	2012-13	Los Mochis, Sin.(4)	RN, RR	FN
	2013-14		RN, RR	FN
	2012-13	Mexicali, B.C.N.(4)	RN, RR	FN
	2013-14		RN, RR	FN
Norte	2012-13	Delicias, Chih.(2)	RN, RR	FN
	2012-13	Río Bravo, Tmp.(4)	RN, RR	FN
	2013-14		RN, RR	FN
	2012-13	Zaragoza, Coah.(4)	RN, RR	FN
	2013-14		RN, RR	FN

RN = riego normal; RR = riego restringido; FN = fecha de siembra normal; FT = fecha de siembra tardía.

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Comparación entre regiones, niveles de riego, especies y genotipos.

El análisis de varianza (Cuadro 1.3) muestra que existieron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en los rendimientos entre ambientes, genotipos y genotipos dentro de especies, tanto en el análisis general como en los otros cinco agrupamientos de ambientes, confirmándose la heterogeneidad de ambientes aun dentro de agrupamientos así como la diversidad significativa ($p \leq 0.01$) entre genotipos y genotipos dentro de especies. La presencia de interacción significativa ($p \leq 0.01$) entre genotipos x ambiente aun dentro de agrupamientos, justifica la exploración del germoplasma elite en los diferentes puntos geográficos del país mediante los ENTRI, sobre todo para los trigos harineros; la excepción de ausencia de interacción genotipo por ambiente fue para los trigos cristalinos y únicamente para los ambientes agrupados en la región Norte y El Bajío.

El contraste entre especies, mostró que hay diferencia significativa ($p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$) en rendimiento de grano entre ellas en cinco de los seis agrupamientos analizados; siendo iguales en rendimiento únicamente en la región Noroeste; sin embargo, la presencia de interacción del contraste entre especies por ambiente es significativa en todos los casos de agrupamiento, señalando con ello la ausencia de paralelismo en el comportamiento superior de una especie sobre otra. En general, los coeficientes de variación fueron menores a 14 %; la excepción fue para la región Norte con 21.4 %; señalando un alto control experimental de la variación y en consecuencia, una alta precisión de la información y calidad de los resultados.

Cuadro 1.3. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano (t ha⁻¹) contrastando el comportamiento de trigos Cristalinos y harineros para los seis agrupamientos de ambientes.

Factores de variación	General		Normal		Reducido		Noroeste		Norte		El Bajío	
	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Modelo	662	6.81**	339	5.83 **	322	6.17**	271	3.68**	169	3.86**	220	5.06**
Ambientes	38	101.23**	19	84.94**	18	103.26**	15	50.71 **	9	49.0**	12	75.16**
Rep (Amb)	39	1.08	20	1.15	19	1.01	16	1.57	10	1.39	13	0.23
Genotipos	15	6.40**	15	3.87**	15	2.80**	15	2.95**	15	5.22**	15	3.78**
Cristalinos	7	3.40**	7	2.40**	7	1.49**	7	2.14**	7	3.39**	7	2.56**
Harineros	7	7.67**	7	4.18**	7	3.54**	7	4.15**	7	4.83**	7	4.29**
Cristalinos vs Harineros	1	18.51* *	1	12.37* *	1	6.85**	1	0.24n s	1	21.06* *	1	8.71*
Genotipos*Amb	570	0.92**	285	0.91**	270	0.89**	225	0.75**	135	0.89**	180	0.85**
Cristalinos*Amb	266	0.63 **	13 3	0.79**	12 6	0.47*	10 5	0.57*	6 3	0.69ns	8 4	0.38n s
Harineros*Amb	266	0.70**	13 3	0.69**	12 6	0.74 **	10 5	0.73**	6 3	0.44**	8 4	0.49**
Cristalinos vs Harineros* Amb	38	4.51**	19	4.35**	18	4.92**	15	2.09**	9	5.51*	1 2	6.61**
Error	585	0.40	300	0.45	285	0.33	240	0.40	150	0.54	195	0.28
CV (%)		13.52		12.75		13.86		10.30		21.43		13.07
Promedio (ton ha ⁻¹)		4.76		5.30		4.20		6.15		3.44		4.07

*, ** Significativo con una probabilidad de $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, respectivamente; ns: no significativo; Amb: ambientes; Rep: repeticiones; CV (%): coeficiente de variación.

Dentro de regiones, y al analizar por separado a los ambientes de riego normal y riego reducido (Cuadro 1.4), prevalecen, en ambos casos, las diferencias que se observan en el análisis general para las distintas fuentes de variación caracterizadas; es decir, dentro de cada región hay diferencias significativas entre los ambientes con riego normal y lo mismo para riego reducido, al igual que las diferencias entre genotipos, genotipos dentro de especies, contrastes entre especies y sus interacciones.

De las regiones productoras de trigo, El Noroeste fue donde se obtuvieron los rendimientos más altos ($p \leq 0.05$) tanto en cristalinos como harineros; le siguieron las regiones de El Bajío y Norte (Cuadro 1.5). En estas regiones, con excepción del Noroeste, los trigos cristalinos fueron superiores ($p \leq 0.05$) en rendimiento de grano a los harineros, siendo máxima esta diferencia en la región Norte; en general, los trigos cristalinos fueron 5.4 % más rendidores ($p \leq 0.05$) que los harineros. Al limitar el riego, ambas especies redujeron en forma significativa ($p \leq 0.05$) su rendimiento, en el análisis general y por regiones. En promedio, tal reducción fue de 20.7 y 20.6 %, para trigos cristalinos y harineros, respectivamente. La menor y mayor reducción fue para de los trigos harineros: 14.2 % en la región Noroeste y 35.2 % en la región Norte, respectivamente; para los trigos cristalinos de 15.4 % en la región Noroeste y 28.6 % para El Bajío, respectivamente.

El rendimiento de los trigos cristalinos y harineros obtenidos en las localidades donde se evaluaron los ENTRI para cada una de las tres regiones, se presenta en el Cuadro 1.6. En promedio de años, niveles de riego y fechas de siembra en las 9 localidades, destacó en forma significativa ($p \leq 0.05$) para producir rendimiento de grano para ambas especies, la localidad Mexicali para la región Noroeste; Zaragoza para la región Norte y Yanhuatlán en el agrupamiento de El Bajío. En estas tres

localidades, sólo en Mexicali los trigos harineros fueron 7.9 % superiores ($p \leq 0.05$) a los trigos cristalinos; en otras localidades como Río Bravo y Roque, también los harineros superaron a los cristalinos en 3.1 y 2.6 %, respectivamente; de aquí la presencia de interacción genotipo por ambiente en el contraste cristalinos contra harineros en cada una de estas tres regiones (Cuadro 1.1).

En las localidades más representativas de cada región (Figuras 1.4 y 1.5), el comportamiento de los genotipos de trigo cristalino y harinero exhibe una pérdida de rendimiento proporcional al cambiar de condición de riego normal a reducido; a excepción de Delicias, donde la pérdida de rendimiento es la más drástica de todas. En el caso de las localidades de mayor rendimiento por región (Figuras 1.6 y 1.7), el comportamiento de los genotipos fue más heterogéneo, observándose una mayor interacción genotipo por ambiente.

Entre genotipos y para el análisis general en riego normal, los trigos cristalinos de mayor rendimiento fueron las líneas experimentales ($p \leq 0.05$): 'V15', 'V11', 'y las variedades: 'Anatoly C2011', 'Cirno C2008' y 'Cevy Oro C2008', mientras que por los harineros lo fueron la línea experimental 'V13' y la variedad 'Borlaug 100 F2014'. En riego reducido, repiten como mejores trigos cristalinos ($p \leq 0.05$) 'V15', 'Anatoly C2011', 'V11', 'Cirno C2008' y se agrega la variedad 'Sáwali Oro C2008', mientras que para los harineros, repiten 'Borlaug 100 F2014' y 'V13' (Cuadro 1.7).

Dentro de las tres regiones (Cuadro 1.7), las cuatro líneas experimentales, las dos de los trigos cristalinos y las dos de los trigos harineros, en general se ubicaron en el primer grupo de significancia, al igual que 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' por los cristalinos y 'Borlaug 100 F2014' por los harineros; las excepciones fueron 'Cirno C2008' en El Bajío riego reducido, y 'V12' en El Bajío riego normal.

Cuadro 1.4. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano (t ha⁻¹) contrastando el comportamiento de trigos Cristalinos y harineros para las tres regiones por nivel de riego.

Factores de variación	Noroeste			El Bajío			Norte			
	GL	Normal CM	Reducido CM	GL	Normal CM	Reducido CM	GL	Normal CM	Reducido CM	
Modelo	135	3.43**	3.05**	118	4.12**	101	4.64**	84	2.62**	3.72**
Ambientes	7	49.65**	41.34**	6	59.65**	5	76.92**	4	26**	54.06**
Rep (Amb)	8	1.58	1.55	7	0.28	6	0.17	5	1.66	1.13
Genotipos	15	1.41**	1.86**	15	2.86**	15	1.43**	15	3.66**	2.2**
Cristalinos	7	1.34**	1.02*	7	1.56**	7	1.47**	7	3.54*	0.68ns
Harineros	7	1.6**	2.97**	7	3.12**	7	1.48**	7	3.57**	1.58**
Cristalinos vs Harineros	1	0.52ns	0.0007ns	1	10.11**	1	0.84ns	1	5.51**	17.15**
Genotipos*Amb	105	0.78**	0.79**	90	0.93**	75	0.82**	60	0.88ns	0.97**
Cristalinos*Amb	49	0.7**	0.50ns	42	0.48ns	35	0.24ns	28	0.81ns	0.55ns
Harineros*Amb	49	0.49ns	1.02**	42	0.69**	35	0.29ns	28	0.34ns	0.67*
Cristalinos vs Harineros* Amb	7	3.3**	1.13ns	6	5.71**	5	8.66**	4	5.35**	6.66**
Error	120	0.41	0.388	105	0.33	90	0.22	75	0.69	0.39
CV (%)		9.70	11.00		12.39		14.01		20.59	22.10
Promedio (ton ha ⁻¹)		6.64	5.66		4.65		3.41		4.05	2.83

*, ** Significativo con una probabilidad de $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, respectivamente; ns: no significativo; Amb: ambientes; Rep: repeticiones; CV (%): coeficiente de variación.

Cuadro 1.5. Contraste de rendimiento (t ha⁻¹) de trigo cristalino (C) y harinero (H), en general, por regiones y niveles de riego.

Agrupamiento	Cristalinos	Harineros	DSH¹	C/H (%)
General	4.89	4.64	0.08	5.40
Normal	5.44	5.16	0.12	5.43
Reducido	4.31	4.10	0.11	5.12
DSH ²	0.10	0.08		
Efecto riego (%) ³	20.7	20.6		
Noroeste	6.18	6.13	0.13	0.82
Normal	6.69	6.60	0.18	1.36
Reducido	5.66	5.66	0.19	0.00
DSH ²	0.15	0.15		
Efecto riego (%) ³	15.4	14.2		
El Bajío	4.22	3.93	0.13	7.38
Normal	4.86	4.43	0.20	9.71
Reducido	3.47	3.34	0.17	3.89
DSH ²	0.16	0.14		
Efecto riego (%) ³	28.6	24.6		
Norte	3.70	3.18	0.18	16.35
Normal	4.24	3.86	0.30	9.84
Reducido	3.16	2.5	0.22	26.40
DSH ²	0.3	0.14	0.08	5.40
Efecto riego (%) ³	25.5	35.2	0.12	5.43
DSH ⁴	0.16	0.12		

DSH = Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey ($p \leq 0.05$). ¹, DSH del contraste entre especies; ², DSH del contraste entre niveles de riego por agrupamiento para cada especie; ³, pérdida de rendimiento en porcentaje al cambiar de condición de riego normal a limitado; ⁴, DSH de la comparación entre regiones; Cristalinos/Harineros (C/H) (%) = [(rendimiento de C - rendimiento de H) / rendimiento de H] × 100.

En el Cuadro 1.8 se presentan las pérdidas del rendimiento en porciento de los genotipos al pasar de riego normal al reducido en los análisis: general y por región.

En general y para trigos cristalinos la variedad 'Anatoly C2011' fue la menos afectada

con 17.2 %, mientras que en los harineros lo fueron 'Borlaug 100 F2014', 'V13' y 'V12' con una pérdida menor a 20 %.

Cuadro 1.6. Comparación del rendimiento (t ha⁻¹) de trigos cristalinos y harineros de las localidades representativas por región.

Localidades	Especie		
	Cristalinos y Harineros	Cristalinos	Harineros
Noroeste			
Mexicali	7.67A	7.38A	7.96A
Los Mochis	5.87	6.12	5.61
Cd. Obregón	5.53	5.59	5.47
DSH (.05)	0.20	0.24	0.22
Norte			
Zaragoza	3.92A	4.40A	3.45A
Delicias	3.54	3.96	3.12
Río Bravo	2.91	2.86	2.95
DSH (.05)	0.28	0.40	0.24
El Bajío			
Yanhuitlán	5.76A	6.73A	4.79A
Roque	3.95	3.90	4.00
La Barca	3.27	3.38	3.16
DSH (.05)	0.23	0.26	0.23

DSH = Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey ($p \leq 0.05$).

En el Noroeste los genotipos menos afectados por la disminución de un riego fueron 'Borlaug 100 F2014', 'V13' y 'V12' por los harineros y 'V11' por los cristalinos; en todos estos casos las disminuciones fueron menores a 12 %. Por el contrario y para las otras dos regiones, El Bajío y Norte, la reducción de cada variedad por la falta de un riego fue superior a 21 %; la excepción fue la variedad de trigo cristalino 'Sáwali Oro C2008' que en la región Norte apenas redujo su rendimiento en 6.8 %.

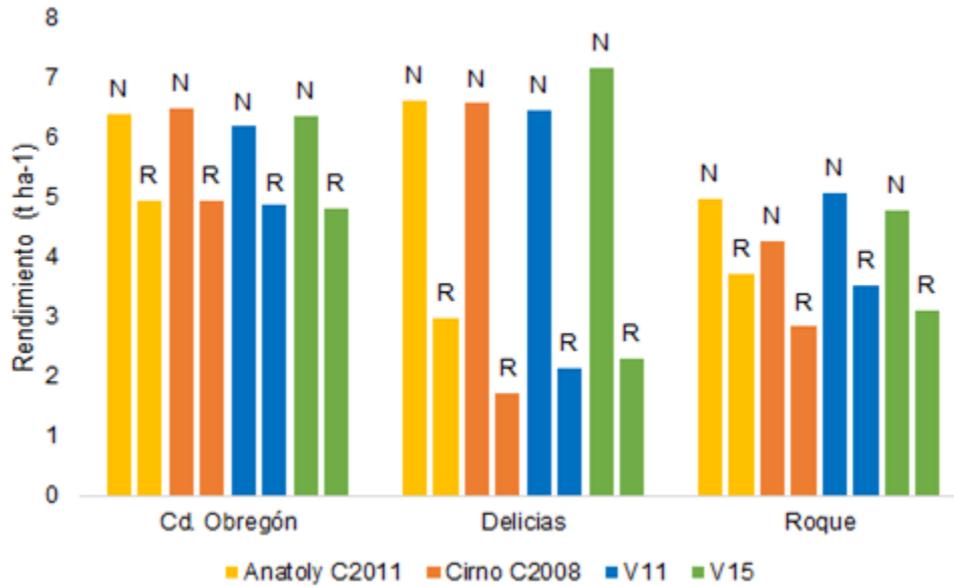


Figura 1.4. Contraste de rendimientos en riego normal (N) y riego reducido (R) para los genotipos de trigo cristalinos en las localidades más representativas de cada región.

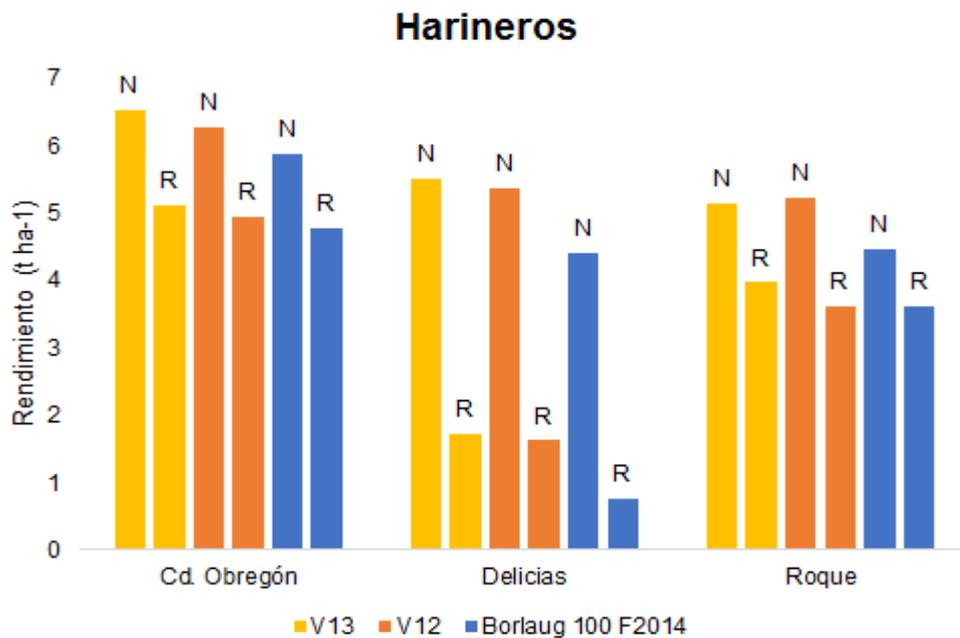


Figura 1.5. Contraste de rendimientos en riego normal (N) y riego reducido (R) para los genotipos de trigos harineros en las localidades más representativas de cada región.

Cristalinos

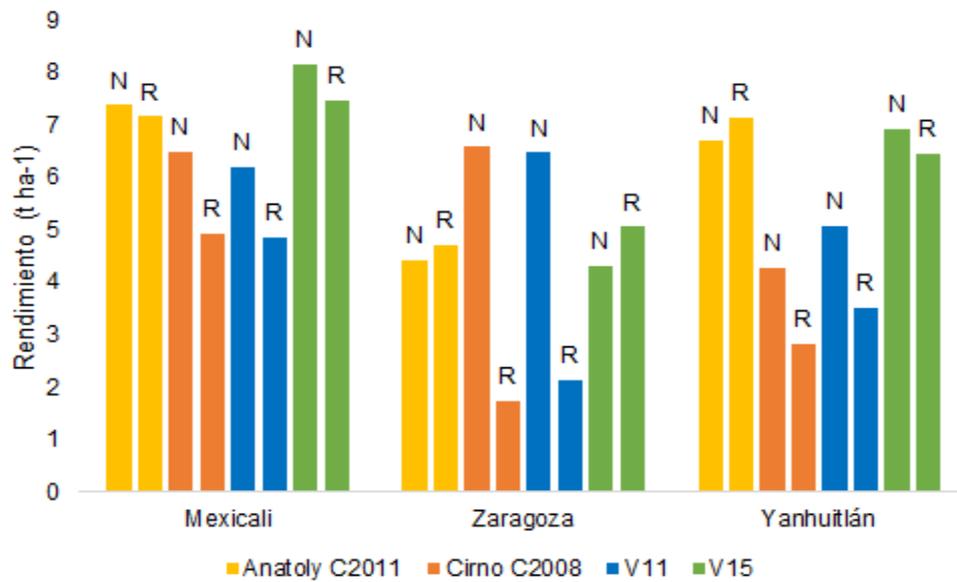


Figura 1.6 Contraste de rendimientos en riego normal (N) y riego reducido (R) para los genotipos de trigo cristalinos en las localidades de mayor rendimiento de cada región.

Harineros

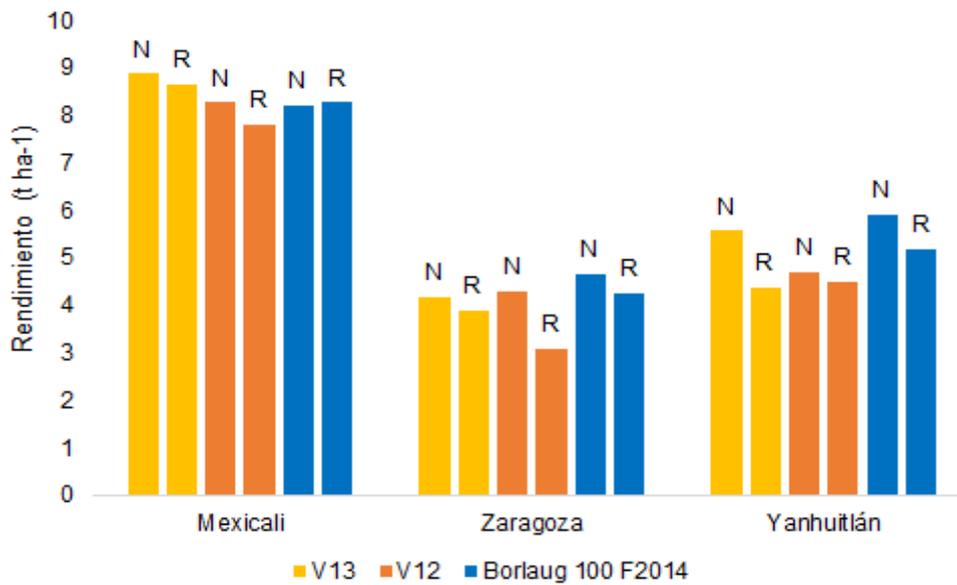


Figura 1.7. Contraste de rendimientos en riego normal (N) y riego reducido (R) para los genotipos de trigos harineros en las localidades de mayor rendimiento de cada región.

Cuadro 1.7. Comparación de medias de rendimiento (ton ha⁻¹) entre genotipos de trigos cristalinos y harineros en el análisis general y por región, en riego normal (N) y reducido (R).

Genotipos	Todos los ambientes		Noroeste		Norte		El Bajío	
	N	R	N	R	N	R	N	R
Cristalinos								
V15	5.87a	4.55a	7.05a	6.02a	4.89a	3.59a	5.23a	3.38a
V11	5.64a	4.51a	6.49a	5.72a	4.84a	3.36a	5.22a	3.84a
Cirno C2008	5.45a	4.15a	6.97a	5.73a	4.41a	2.87a	4.65a	3.04
Anatoly C2011	5.49a	4.54a	6.70a	5.81a	4.07a	3.19a	5.11a	3.97a
Gema C2004	5.32	4.25a	6.45a	5.39a	4.11a	2.87a	4.89a	3.76a
Cevy Oro C2008	5.39a	4.09	6.43a	5.26	4.74a	3.33a	4.66a	3.16
Sáwali Oro C2008	5.28	4.28a	7.03a	5.82a	3.07	2.86a	4.85a	3.42a
Movas C2009	5.06	4.08	6.38	5.40a	4.07a	3.08a	4.25	3.17
DSH (.05)	0.50	0.41	0.67	0.69	1.43	0.98	0.75	0.62
Harineros								
V13	5.66a	4.56a	6.99a	6.23a	4.37a	2.97a	5.06a	3.66a
Borlaug100 F2014	5.51a	4.45a	6.62a	5.99a	4.59a	3.13a	4.90a	3.50a
V12	5.22	4.21	6.52a	5.75a	4.28a	2.65a	4.41	3.45a
Kronstad F2004	5.10	3.95	6.66a	5.30	3.94a	2.48a	4.15	3.39a
Roelfs F2007	5.12	4.04	6.73a	5.78a	3.7a	2.35	4.28	3.13a
Tacupeto F2001	4.88	3.85	6.63a	5.76a	3.96a	2.34	3.54	2.56
Urbina S2007	4.66	3.63	5.89	4.82	2.96	2.01	4.48a	3.40a
Villa Juárez F2009	5.09	4.07	6.73a	5.67	3.08	2.07	4.65a	3.61a
DSH (.05)	0.40	0.33	0.55	0.52	0.66	0.75	0.63	0.57

DSH = Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey ($P \leq 0.05$)

Cuadro 1.8. Pérdida porcentual del rendimiento de genotipos de trigos cristalinos y harineros al cambiar de nivel de riego normal a riego reducido en el análisis general y por región.

Genotipos	General	Noroeste	El Bajío	Norte
Cristalinos				
V15	22.6	14.6	35.4	26.6
V11	20.0	11.9	26.6	30.6
Cirno C2008	23.9	17.8	34.6	34.9
Anatoly C2011	17.2	13.3	22.3	21.6
Gema C2004	20.1	16.4	23.1	30.2
Cevy Oro C2008	24.1	18.2	32.2	29.7
Sáwali Oro C2008	18.8	17.2	29.5	6.8
Movas C2009	19.2	15.4	25.4	24.3
Harineros				
V13	19.4	10.9	27.7	32.0
Borlaug100	19.3	9.5	28.6	31.8
V12	19.3	11.8	21.8	38.1
Kronstad F2004	22.5	20.4	18.3	37.1
Roelfs F2007	21.2	14.1	26.9	36.5
Tacupeto F2001	21.2	13.1	27.7	40.9
Urbina S2007	22.0	18.2	24.1	32.1
Villa Juárez F2009	20.0	15.8	22.4	32.8

2.4.2. Análisis por fecha de siembra en Cd. Obregón y Roque

Dentro de fechas de siembra, normal y tardía en Ciudad Obregón, Son. y Roque, Gto. (Cuadro 1.9), prevalecieron en ambas fechas y sitios, las diferencias significativas entre los ambientes, entre los genotipos y entre los genotipos dentro especies; la excepción fue para los trigos cristalinos en siembras tardías en Roque. El comportamiento entre trigos cristalinos y harineros fue significativamente igual en Cd. Obregón fecha tardía y Roque fecha normal y significativamente diferente en Cd. Obregón fecha normal y Roque fecha tardía. Los trigos cristalinos no presentaron interacción significativa dentro de cada fecha en ambos sitios; en cambio, los harineros sí para la segunda fecha en ambos sitios. Los coeficientes de variación resultaron en todos los casos por abajo del 14 %.

Cuadro 1.9. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano (t ha⁻¹) contrastando el comportamiento de trigos cristalinos y harineros en fecha de siembra normal (FN) y tardía (FT) en las localidades de Cd. Obregón y Roque.

Factores de variación	Cd. Obregón			Roque		
		FN	FT		FN	FT
	GL	CM	CM	GL	CM	CM
Modelo	67	3.57**	1.74**	67	3.82**	2.09**
Ambientes	3	69.57**	31.75**	3	62.34**	34.65**
Rep (Amb)	4	0.59	0.45	4	0.57	0.14
Genotipos	15	1.0**	0.52**	15	3.25**	0.97**
Cristalinos	7	0.52*	0.51**	7	1.77**	0.43ns
Harineros	7	1.40**	0.61**	7	5.18**	1.36**
Cristalinos vs Harineros	1	1.51*	0.13ns	1	0.10ns	1.97**
Genotipos*Amb	45	0.29ns	0.26**	45	0.39ns	0.467**
Cristalinos*Amb	21	0.18ns	0.15ns	21	0.22ns	0.34ns
Harineros*Amb	21	0.36ns	0.20**	21	0.48ns	0.13**
Cristalinos vs Harineros* Amb	3	0.66ns	1.51**	3	1.02ns	3.68**
Error	60	0.26	0.96	60	0.36	0.14
CV (%)		8.57	5.91		13.90	10.65
Promedio (ton ha ⁻¹)		5.83	5.24		4.33	3.57

*, ** Significativo con una probabilidad de $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente; ns: no significativo; Amb: ambientes; Rep: repeticiones; CV (%): coeficiente de variación.

Entre fechas de siembra, hubo diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los ensayos de siembra normal con los de siembra tardía en las localidades de Cd. Obregón y Roque (Cuadro 1.10); con excepción para los trigos harineros, en la localidad de Roque, para el resto de factores de variación analizados (Cuadro 1.10) no hubo diferencias significativas, incluyendo todas las interacciones con fechas de siembra.

Cuadro 1.10. Cuadrados medios (CM) y grados de libertad (GL) del análisis de varianza para rendimiento de grano (t ha⁻¹) contrastando el comportamiento de trigos cristalinos y harineros en las localidades de Cd. Obregón y Roque.

Factores de variación	Cd. Obregón		Roque	
	GL	CM	GL	CM
Modelo	3	1.46	3	3.07**
Fecha de siembra	1	22.45**	1	37.62**
Rep (FS)	2	1.49	2	0.19
Genotipos	15	18.29	15	3.37**
Cristalinos	7	0.69	7	1.9
Harineros	7	1.79	7	5.23**
Cristalinos vs Harineros	1	0.9	1	0.85
Genotipos*FS	15	0.31	15	0.85
Cristalinos*FS	7	0.34	7	0.3
Harineros*FS	7	0.23	7	1.31
Cristalinos vs Harineros* FS	1	0.62	1	1.49
Error	222	3.51	222	363.00
CV (%)		22.73		32.33
Promedio (ton ha ⁻¹)		5.53		3.95

** Significativo con una probabilidad $P \leq 0.01$; Amb: ambientes; Rep: repeticiones; FS: fecha de siembra; CV (%): coeficiente de variación.

El uso de la fecha recomendada de siembra de trigos cristalinos y harineros para las localidades de Cd. Obregón y Roque, siempre fue superior ($p \leq 0.05$) a la siembra tardía; la siembra tardía redujo el potencial de rendimiento de genotipos en Cd. Obregón 11.62 y 8.57 %, para trigos cristalinos y harineros, respectivamente, y con mayor reducción en Roque, 21.10 y 14.20 %, para cristalinos y harineros, respectivamente (Cuadro 1.11). En Cd. Obregón, los trigos cristalinos fueron 3.85 y 0.38 % superiores a los harineros, en las fechas de siembra normal y tardía; mientras que para Roque y en la fecha tardía, los harineros tuvieron más rendimiento.

Cuadro 1.11. Comparación de rendimientos (ton ha⁻¹) obtenidos en las dos fechas de siembra de trigo cristalino (C) contra trigo harinero (H) en Cd. Obregón y Roque.

Agrupamiento	Cristalinos	Harineros	DSH ¹	C/H (%)
Obregón	5.59	5.47	0.30	2.19
Normal	5.94	5.72	0.21	3.85
Tardía	5.25	5.23	0.14	0.38
DSH (0.05) ²	0.45	0.42		
Efecto fecha (%) ³	11.62	8.57		
Roque	4.00	3.90	0.32	2.56
Normal	4.36	4.30	0.30	1.40
Tardía	3.44	3.69	0.18	-6.78
DSH (0.05) ²	0.50	0.39		
Efecto fecha(%) ³	21.10	14.20		

DSH = Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey (P≤0.05). ¹, DSH del contraste entre especies; ², DSH para el contraste entre fechas de siembra por agrupamiento para cada especie; ³, Efecto en el rendimiento de grano al cambiar de fecha de siembra Normal a Tardía; Cristalinos/Harineros (%)= [(rendimiento de C- rendimiento de H)/ rendimiento de H] × 100.

El análisis de medias entre genotipos para las localidades de Cd. Obregón y Roque mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) tanto en genotipos de trigos harineros para ambas fechas de siembra como los de trigos cristalinos, con la excepción de Roque fecha tardía (Cuadro 1.12). En Roque, tal efecto en los genotipos fue mayor que en Cd. Obregón, localidad donde el efecto de fecha de siembra tardía en los trigos cristalinos para los genotipos con rendimiento más alto ($p \leq 0.05$) varió desde 4.76 % para ‘Sáwali Oro C2008’, hasta 16.94 % para ‘Anatoly C2011’; por los trigos harineros tal efecto fue desde 3.33 % para la variedad ‘Borlaug 100 F2014’ hasta 12.56 % para la variedad ‘Villa Juárez F2009’. En Roque, el efecto de fecha de siembra para los genotipos de trigos cristalinos con rendimiento más alto ($p \leq 0.05$), varió desde 15.9 % para ‘Sáwali Oro C2008’, hasta 25.35 % para ‘Anatoly C2011’; por el contrario para los genotipos de trigo harinero tal reducción varió de 16.98 % para ‘Borlaug 100 F2014’ hasta 28.57 % para la línea experimental ‘V 13’.

Cuadro 1.12. Comparación de rendimiento (t ha⁻¹) de genotipos de trigo cristalino y harinero y efecto al cambiar de fecha normal (FN) a fecha tardía (FT) en Cd. Obregón y Roque.

Genotipos	Cd. Obregón			Roque		
	FN	FT	Efecto	FN	FT	Efecto
Cristalinos						
V15	6.36A	5.63A	11.48	4.43A	3.45A	22.12
Anatoly C2011	6.20A	5.15	16.94	4.97A	3.71A	25.35
Cirno C2008	5.81A	5.52A	4.99	3.88	3.23A	16.75
V11	5.83	5.21A	10.63	4.98A	3.63A	27.11
Cevy Oro C2008	5.96A	4.96	16.78	3.91	3.23A	17.39
Gema C2004	6.06A	5.16A	14.85	4.58A	3.57A	22.05
Movas C2009	5.61	4.93	12.12	3.80	3.08A	18.95
Sáwali Oro C2008	5.67A	5.40A	4.76	4.34A	3.65A	15.90
DSH(.05)	0.74	0.56		0.90	0.79	
Harineros						
V13	6.09A	5.56A	8.70	5.32A	3.80A	28.57
Borlaug100 F2014	5.70A	5.51A	3.33	4.83A	4.01A	16.98
V12	5.60A	5.05	9.82	4.59A	3.49	23.97
Roelfs F2007	6.13A	5.38A	12.23	3.99	3.51	12.03
Villa Juárez F2009	6.21A	5.43A	12.56	4.85A	3.94A	18.76
Kronstad F2004	5.49A	4.92	10.38	3.95	3.83A	3.04
Tacupeto F2001	5.58A	5.11	8.42	2.69	2.83	-5.20
Urbina S2007	4.94	4.84	2.02	4.22	4.12A	2.37
DSH(.05)	0.94	0.44		1.06	0.35	

Diferencia significativa honesta (DSH). Tukey (P≤0.05). Efecto= (1-(FT/FN) × 100).

2.5. DISCUSIÓN

Derivado de los análisis de varianza generados a partir de la base de datos del rendimiento de grano obtenido de 39 Ensayos Nacionales de Trigos de Riego, realizados en los años de 2013 y 2014 (Cuadro 1.2), se pudo constatar la diversidad y diferencia significativa entre ambientes de riego de las principales zonas donde evalúan, cultivan y producen los trigos harineros y cristalinos de México; tales diferencias fueron incluso identificadas dentro de regiones más uniformes como lo serían el Noroeste, Norte o El Bajío (Cuadros 1.3 y 1.4). A esta diversidad ambiental, se sumó la presencia de interacción significativa entre genotipos por ambiente, tanto en el análisis general como en el análisis dentro de regiones, sobre todo para los trigos harineros. En estos resultados, fue notorio la ausencia de interacción entre los trigos cristalinos con los ambientes dentro de la región Norte y El Bajío; es decir, si bien hubo para trigos cristalinos diversidad ambiental en estas dos regiones, los genotipos exhibieron un comportamiento paralelo en su rendimiento en cada uno de los 10 ambientes explorados por el ENTRI en la región Norte y de los 14 ambientes explorados en la región de El Bajío. Aquí se plantea que para trigos cristalinos, la posibilidad de reducir los esfuerzos de evaluación utilizando pocos ambientes, tal vez los más representativos (Figura 1.4). Para el caso de los trigos harineros, al parecer y derivado de los resultados, la exploración del germoplasma elite en los diferentes puntos geográficos donde se cultiva esta especie, es obligada. Cabe destacar el comportamiento de los genotipos de ambas especies en Ciudad Obregón y Roque donde los genotipos exhiben una pérdida proporcional en su rendimiento al cambiar de condición de riego normal a limitado, más no es así en Delicias, donde los genotipos experimentan una abrupta pérdida en su

rendimiento (Figura 1.4 y 1.5). Este fenómeno es debido a los dos enfoques que tienen los programas de mejoramiento genético de trigo, el del Noroeste que se realiza en Cd. Obregón y El Bajío en Roque (Celaya), localidades en donde se realizan la mayor parte de los esfuerzos para derivar estos genotipos elite, por lo que durante el proceso de selección, los genotipos son sometidos a las condiciones propias de dichos lugares, lo que ha creado una adaptación a dichos ambientes. En cuanto a las localidades donde se tuvieron los mejores rendimientos de cada región, los trigos cristalinos interactúan más al pasar de un nivel de riego a otro, mas no es así con los trigos harineros, que muestran una pérdida más proporcional de rendimiento (Figura 1.6 y 1.7).

En el contraste entre especies, los rendimiento de los trigos cristalinos fueron superiores a los harineros, con las excepciones de los agrupamientos de la región Noroeste; contrario a lo que ocurría en los años ochenta donde el trigo cristalino era más rendidor en esta región (Huerta *et al.*, 2011), de esta manera se evidencia los avances que han tenido tanto el programa de mejoramiento de genético de trigo cristalino como el de harinero en el Noroeste, ya que han ido aumentando el rendimiento de sus genotipos, en especial el de harinero, al punto de ahora estar a la par.

Martí y Slaffer (2014) mencionan que en los años sesentas los trigos harineros eran más rendidores que los trigos cristalinos en condiciones de riego reducido, no obstante la brecha entre los rendimientos se estrechó con el paso del tiempo, promovido por la aparición de variedades de alto rendimiento a inicios de los años 2000; sin embargo, basados en los resultados presentados en los Cuadros 5 y 11, se puede constatar que actualmente el trigo cristalino llega a ser igual o superior al harinero al eliminarse el ultimo riego de auxilio en cierto agrupamiento de ambientes; estos mismos autores mencionan

que el éxito del mejoramiento de trigo cristalino respecto al trigo harinero fue el enfoque de los programas de mejoramiento, en el trigo cristalino fue hacia un mayor tamaño de grano, mientras que el harinero un mayor número de granos m^{-2} (Marti y Slafer, 2014). A pesar de los resultados obtenidos, donde se observa que el trigo cristalino es generalmente más sensible a los cambios ambientales respecto a los harineros, diversos estudios mencionan que la característica de tamaño de grano es uno de los componentes de rendimiento que menos afectados se ve por el ambiente (Sadras y Slafer, 2012), al contrario el número de granos por/m^2 , que exhibe mucha plasticidad, siendo muy afectado por el ambiente (Marti y Slafer, 2014; Sadras, 2007).

En el caso específico de los genotipos, las líneas experimentales de ambas especies, junto con las variedades de más reciente liberación de los trigos cristalinos 'Cirno C2008', 'Anatoly C2011', y de los harineros 'Borlaug 100 F2014', presentaron un rendimiento generalmente superior en el caso de los ocho agrupamientos de ambientes del Cuadro 1.7; a su vez dichos genotipos a excepción de 'Cirno C2008' fueron las que presentaron generalmente un menor efecto en la disminución de rendimiento al cambiar de nivel de riego, de esta forma se da testimonio de los avances que tienen los programas de mejoramiento genético en la búsqueda de materiales resistentes a estrés hídrico.

La fecha de siembra también fue un factor determinante en el comportamiento de los genotipos, ya que como se muestra en los Cuadros 1.9 y 1.11, la diferencia significativa entre los rendimientos de las especies se dio en la fecha tardía de Cd. Obregón y fecha normal en Roque, en ambos casos siendo superior el rendimiento de los trigos cristalinos. En el caso de las interacciones, cabe destacar que los trigos cristalinos no presentaron interacción genotipo por ambiente en ninguna fecha de siembra para estas localidades;

mas no es así en el caso de los trigos harineros, los cuales interaccionaron con los ambientes de fecha tardía en ambas localidades.

El comportamiento de los genotipos fue diferente entre fechas de siembra, esto para ambas localidades, tal como se muestra en el Cuadro 1.10; de hecho el rendimiento de las especies y de los genotipos generalmente se ve disminuido al comparar la fecha normal contra la tardía, con contadas excepciones. Si bien los trigos cristalinos mostraron un mayor rendimiento en las evaluaciones respecto a los harineros, con la excepción presentada en Roque con fecha tardía, el efecto de fecha de siembra fue siempre mayor en trigos cristalinos que en harineros; por lo que los efectos de factores abióticos que se podrían presentarse en condiciones de fecha tardía, se manifiestan con mayor intensidad en los trigos cristalinos. La problemática recurrente asociada a las fechas tardías de siembra en ambas localidades donde se realizaron las evaluaciones son altas temperaturas en etapas de llenado de grano del ciclo del cultivo, las cuales afectan considerablemente el rendimiento (Solís *et al.*, 2007; Félix *et al.*, 2009).

Haciendo referencia en lo mencionado y según los resultados mostrados en el Cuadro 1.12, los genotipos 'V15', 'Cirno C2008', 'Gema C2004' 'Sáwali Oro C2008' de los trigos cristalinos y 'Borlaug 100 F2014', 'V13', 'Roelfs F2007' y 'Villa Juárez F2009' de los harineros para Cd. Obregón estuvieron entre los genotipos de mayor rendimiento en ambas fechas de siembra. En Roque los genotipos las líneas experimentales 'V15' y 'V11' junto con 'Anatoly C2008', 'Gema C2004' y 'Sáwali Oro C2008' de los trigos cristalinos, y 'V12', 'Borlaug100 F2014' y 'Villa Juárez F2009' de los harineros fueron las de mayor rendimiento; sin embargo en ambas localidades, y en los genotipos anteriormente

mencionados el efecto de la fecha de siembra fue distinto, aunque no lo bastante fuerte como para que no figuraran entre los mejores genotipos en ambos agrupamientos.

En virtud de lo anteriormente mencionado, cabe destacar la importancia de dichos Ensayos Nacionales de Trigo de Riego, donde es posible comprar el efecto de los diversos ambientes presentes en el país sobre el rendimiento de diferentes genotipos; así como comparar las variedades elite que conforman los mosaicos genéticos de cada región contra las líneas candidatas a liberación de ambas especies.

2.6. CONCLUSIONES

El rendimiento de grano de los trigos cristalinos y harineros dependió del potencial productivo de las regiones de estudio, corroborando la diversidad ambiental presente en el país, al punto de existir interacción significativa en el comportamiento de los genotipos de ambas especies, inclusive dentro de regiones.

El trigo cristalino no presentó interacción en la región del Norte y El Bajío a pesar de la diversidad ambiental, por lo que se plantea reducir el número de ambientes de evaluación a los más representativos; no así en el caso de los harineros, donde la exploración en diferentes puntos geográficos es obligada debido a la presencia de interacción.

El rendimiento de los trigos cristalinos fue estadísticamente más alto al de los trigos harineros en todos los agrupamientos de ambientes analizados; las excepciones fueron las regiones del Noroeste y de El Bajío riego reducido.

En general y por región, el limitar el riego en la etapa de llenado de grano, afectó negativa y significativamente el rendimiento de grano de ambas especies en la misma proporción en el Noroeste y El Bajío, tal efecto detrimental fue de hasta 15 y 25 % respectivamente; en el Norte los trigos harineros tuvieron una mayor pérdida con un 35.2 % contra un 25.5 % de los cristalinos.

La fecha de siembra tardía tuvo un efecto detrimental y significativo en el rendimiento de los genotipos de trigos cristalinos y harineros; en las dos localidades donde se evaluó este factor, el rendimiento disminuyó al pasar de la primera a la segunda fecha de siembra y con mayor impacto en los cristalinos que en los harineros.

Con base a los resultados obtenidos se demuestra la importancia de los ENTRI como herramienta estratégica para identificar genotipos candidatos a liberación, tal es el caso

de las líneas avanzadas probadas que demostraron un buen desempeño al estar en los grupos estadísticos de mayor rendimiento junto con las variedades elite 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos y 'Borlaug 100' para los harineros; además estos genotipos fueron los que presentaron menor disminución en su rendimiento al cambiar de nivel de riego, dando testimonio de los avances en la búsqueda de materiales resistentes a estrés hídrico.

2.7. BIBLIOGRAFÍA

- Aquino Mercado, P.R., R.J. Peña Bautista, y I. Ortíz Monasterio. 2008. Mexico y el CIMMYT. Primera Ed. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Borlaug, N.E. 1969. Mejoramiento del trigo: Su impacto en el abastecimiento mundial de alimentos. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- Brajcich, P., J.M. Prescott, T.C. Barker, A. Amaya C., y R.J. Peña B. 1987. Development of Superior Durum Wheat Germplasm -Altar 84. p. 48-58. *En* CIMMYT Research Highlights 1986. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Braun, H.-J., y T. Payne. 2013. Fitomejoramiento en mega-ambientes (MP Reynolds, AJD Pask, DM Mullan, y PN Chavez-Dulanto, Eds.). Fitomejoramiento fisiológico I enfoques Interdiscip. para Mejor. la Adapt. del Cultiv.: 6-17.
- Cortés J., J.M., G. Fuentes D., J.E. Ortiz E., L.M. Tamayo E., E. Cortez M., A.A. Ortiz Á., P. Félix V., y I. Armenta C. 2011. Agronomía del Trigo en el Sur de Sonora.
- Félix Valencia, P., J. Grageda Grageda, J.G. Quintana Quiroz, G. Fuentes Dávila, y J.E. Ortíz Enríquez. 2009. Horas frío en relacion al rendimiento de trigo. Areas de producción del estado de Sonora. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Figueroa López., P., J.L. Félix Fuentes, G. Fuentes Dávila, V. Valenzuela Herrera, G. Chávez Villalba, y J.A. Mendoza Lugo. 2010. Cirno C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de sonora. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* 1(5): 745-749.
- Fischer, R.A. 2011. Wheat physiology: A review of recent developments. *Crop Pasture Sci.* 62(2): 95-114.
- Fuentes Dávila, G., P. Figueroa López., M.A. Camacho Casas, J.L. Félix Fuentes, y G. Chávez Villalba. 2014. ' Quetchehueca oro c2013 ', a new durum wheat cultivar for northwest México. *Rev. Fitotec. Mex.* 37(4): 399-401.
- Fuentes Pochat, J.L. 2013. Reporte estadístico 2013. Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo.
- Huerta Espino, J., H.E. Villaseñor Mir, E. Espitia Rangel, E. Solís Moya., y M. Van Ginkel. 2011. The history of wheat breeding in Mexico. p. 277-308. *En* Bonjean, A.P., Angus, W.J., Van Ginkel, M. (eds.), *The World Wheat Book*.
- INECC-SEMARNAT. 2012. Adaptación al cambio climático en México: visión , elementos y criterios para la toma de decisiones. Prim. Ed.: 186.
- Kohli, M.M., M. Ackermann, y M. Castro. 2001. Estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo: un enfoque multidisciplinario. Seminario . CIMMYT*INIA, La Estanzuela, Uruguay.
- Marti, J., y G.A. Slafer. 2014. Bread and durum wheat yields under a wide range of environmental conditions. *F. Crop. Res.* 156: 258-271.
- Mellado, M. 1991. Comportamiento de trigo y otros cereales en áreas con déficit hídrico en la zona centro de sur de Chile. p. 133-148. *En* *Breeding for Drought Resistance in Wheat: Proceedings of the Workshop, Marcos Juarez, Argentina, from 28-30 august 1989.* first.

CIMMYT, Mexico, D.F.

- Mergoum, M., P.K. Singh, J.A. Anderson, R.J. Peña Bautista, R.P. Singh, S.S. Xu, y J.K. Ransom. 2009. Spring Wheat Breeding. p. 127-156. *En* Carena, M.J. (ed.), Handbook of Plant Breeding - Cereals. Springer US.
- Muñoz O., A. 2005. Centli-maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Potencial, Origen Genético y Geográfico. 2da. ed. Colegio de Postgraduados, Mexico, D.F.
- OEIDRUS. 2014. Trigo situación actual. Available at <http://www.oeidrus-bc.gob.mx/sispro/trigobc/Produccion/Mundial/Nacional2.pdf>.
- Pfeiffer, W.H., K.D. Sayre, M.P. Reynolds, y T.S. Payne. 2001. Increasing yield potential and yield stability in durum wheat. p. 569-577. *En* Wheat in a Global Environment.
- Rajaram, S. 1995. Wheat germoplasm improvement: historical perspectives, philosophy, objectives, and missions. p. 1-10. *En* Rajaram, S., Hettel, G.P. (eds.), Wheat breeding at CIMMYT: commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement. Wheat Special Report No. 29. Mexico, D.F.
- Sadras, V.O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *F. Crop. Res.* 100(2-3): 125-138.
- Sadras, V.O., y G.A. Slafer. 2012. Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *F. Crop. Res.* 127: 215-224.
- SIAP. 2015. – Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera » Cierre de la producción agrícola por estado. Available at <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.
- Singh, R.P., J. Huerta-Espino, S. Rajaram, y J. Crossa. 1998. Agronomic Effects from Chromosome Translocations 7DL.7Ag and 1BL.1RS in Spring Wheat. *Crop Sci.* 38(1): 27 Available at <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/38/1/CS0380010027>.
- Singh, R.P., J. Huerta Espino, S. Rajaram, y J. Crossa. 2001. Grain yield and other traits of tall and dwarf isolines of modern bread and durum wheats. *Euphytica* 119(1-2): 241-244.
- Singh, R.P., J. Huerta Espino, y H.M. William. 2005. Genetics and breeding for durable resistance to leaf and stripe rusts in wheat. *Turkish J. Agric. For.* 29(2): 121-127 Available at <http://repository.cimmyt.org:8080/xmlui/handle/10883/2421>.
- Solís Moya, E., y J.G. Díaz de León Tobías. 2001. Efecto de los factores controlables de la producción sobre el rendimiento y la panza blanca del grano en trigo duro. *Terra Latinoam.* 19(4): 375-383
- Solís Moya, E., J. Huerta Espino, J. Ireta Moreno, R. Sanchez de la Cruz, H.E. Villaseñor Mir, E. Espitia Rangel, y A. Ramirez Ramirez. 2009. Josecha F2007, new wheat cultivar for El Bajío region and irrigated areas of northern Mexico. *Agric. Tec. en Mex.* 35(4): 475-479.
- Solís Moya, E., S.A. Ríos Ruiz, H. García Nieto, A. Arevalo Valenzuela, O.A. Grageda Cabrera, M.A. Vuelvas Cisneros, J.G. Díaz de León Tobías, J.L. Aguilar Acuña, A. Ramirez Ramirez, J. Narro Sánchez, R. Bujanos Muñoz, A. Marín Jarillo, y R. Peña Martínez. 2007. Producción de trigo en El Bajío. 94p.
- Stapper, M., y R.A. Fischer. 1990. Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in Southern New South Wales, 1. phasic development, canopy

growth and spike production.

- Urbina Amador, R., y E. Solís Moya. 1991. Marte M86, Saturno S86 y Romuma M86, variedades de trigo harinero para El Bajío. Celaya, Guanajuato, Mexico.
- Villarreal, R.L. 1995. Expanding the Genetic Base of CIMMYT? Bread Wheat Germplasm. p. 16-21. *En* Rajaram, S., Hettel, G.P. (eds.), *Wheat breeding at CIMMYT: commemorating 50 years of research in Mexico for global wheat improvement*. Wheat Special Report No. 29. Mexico, D.F.
- Villaseñor Mir, H.E. 2000. Reseña del programa de mejoramiento genético de trigo para temporal en México. *Agric. Técnica en México* 26(1): 109-123.
- Villaseñor Mir, H.E., A. Limón Ortega, M.F. Rodríguez García, E. Martínez Cruz, R. Hortelano Santa Rosa, y L.A. Mariscal Amaro. 2011. Evaluación bajo condiciones de temporal de variedades de trigo macarronero generadas para riego. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* 2(5): 759-764.
- Zwer, P.K., y C.O. Qualset. 1994. Genes for resistance to stripe rust in four spring wheat varieties. *Euphytica* 74(1-2): 109-115.

III. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD Y CONSISTENCIA DEL RENDIMIENTO DE GENOTIPOS DE TRIGOS HARINEROS Y CRISTALINOS PARA SISTEMAS DE RIEGO

RESUMEN

La evaluación del comportamiento de los genotipos en diferentes ambientes es clave en el mejoramiento genético, ya que con el empleo de ensayos multiambientes es posible evaluar la estabilidad y consistencia del rendimiento. Para esto, el Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias ha dispuesto una serie de ensayos llamados Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI) en las principales regiones productoras de trigo de riego en México, esto con el propósito de evaluar la diversidad ambiental presente en el país y la respuesta de los genotipos a esa diversidad, a fin de identificar variedades candidatas a liberación. Para tal fin, se recurrió a la base de datos de 8 genotipos de trigo cristalino y mismo número de trigo harinero en 39 ensayos del ENTRÍ, correspondientes a las regiones del Noroeste, Norte y El Bajío en los ciclos invierno-primavera 2012-2013 y 2013-2014, sembrados bajo condiciones de riego normal y reducido. La evaluación de la estabilidad y consistencia se realizó mediante el uso del coeficiente de variación, parámetros de Eberhart y Russell, el análisis de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y el de regresión de sitios. Los resultados obtenidos muestran que existe complementación entre los análisis utilizados para interpretar la Interacción genotipo por ambiente. En los análisis AMMI realizados para las tres regiones productoras se encontró un gran efecto de los años sobre el comportamiento de los genotipos de ambas especies, resaltando la importancia de la continuidad de los ENTRÍ. La variabilidad ambiental presente en los ENTRÍ permitió identificar genotipos estables que mantuvieron su rendimiento a pesar de las diferentes condiciones a las cuales fueron sometidos. Esos genotipos fueron tres de las cuatro líneas experimentales candidatas a liberación de ambas especies, así como las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos y 'Borlaug 100 F2014' de los harineros.

Palabras Clave: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., estabilidad, AMMI, SREG

III. EVALUATION OF STABILITY AND CONSISTENCY OF YIELD PERFORMANCE OF BREAD AND DURUM WHEAT GENOTYPES FOR IRRIGATION SYSTEMS

ABSTRACT

Performance evaluation genotypes in different environments is key in plant breeding programs, since with the use of multivmental trials it is posible to assess stability and consistency of yield performance. For this, the National Program of Wheat of the National Research Institute for Forestry, Agricultural and Animal has arranged a series of essays called national trials of irrigation wheat (ENTRI) in the main producing regions of irrigated wheat in Mexico, this with the purpose of evaluating the environmental diversity present in the country as well as the performance of genotypes in that diversity, in order to identify phenotypically stable genotypes. For this reason, this study used the database of 8 genotypes of durum wheat and same number of bread wheat genotypes in 39 essays of the ENTRI, corresponding to the Northwest, North, and El Bajio regions during the winter-spring cycles 2012-2013 and 2013-2014, under well-watered and reduced irrigation conditions. The stability and consistency were evaluated using the coefficient of variation, Eberhart and Russell parameters, Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) and Sites Regression. The results obtained in this study showed that there is complementarity between the analyses used to interpret the genotype by environment interaction. In the AMMI analysis carried out for the three regions was found a great effect of the years in the genotypes performance, highlighting the importance of the continuity of the ENTRI. Environmental variability present in the ENTRI allowed the identification of stable genotypes which maintained its performance despite the different biotic and abiotic conditions to which they were subjected. These genotypes were three of four experimental lines candidates for release of both species, as well as the varieties 'Cirno C2008' and ' Anatoly C2011 of durum wheat and 'Borlaug 100 F2014' for bread wheat.

Key words: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., stability, AMMI, SREG

3.1. INTRODUCCIÓN

La evaluación del comportamiento agronómico de los cultivares en diferentes ambientes es de gran importancia para el fitomejoramiento, porque le permite por un lado, conocer la adaptabilidad y adaptación de los genotipos a través de ambientes heterogéneos en años, regiones agrícolas y localidades, y por otro, identificar cultivares candidatos a liberación particularmente de aquellos que mantienen su expresión fenotípica tanto en condiciones desfavorables como favorables y de los que presentan adaptación específica para una serie de ambientes estratificados con condiciones similares. Los esquemas de mejoramiento de trigo se centran generalmente en la generación de germoplasma de amplia adaptabilidad. Braun *et al.* (1996) mencionan que la clave para generar germoplasma con alto rendimiento, estables y con adaptabilidad para una gran amplitud de ambientes consiste en seleccionar y probar el germoplasma en condiciones próximas y representativas de los multiambientes. Con esta estrategia, mencionan, es posible acumular de manera piramidal un gran número de resistencias genéticas contra factores abióticos y abióticos desfavorables de cada ambiente.

Basados en la gran diversidad ambiental presente en México, desde nichos particulares, hasta extensas regiones agrícolas, es importante que en programas de fitomejoramiento específico, como lo es el Programa Nacional de Trigo (PNT) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, dediquen una gran cantidad de esfuerzos y recursos para asegurarse que las futuras variedades respondan de manera general o específica a esta diversidad. Con este propósito y considerando sólo las áreas de riego, el PNT que incluye a trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) y cristalinos (*T. durum* L), instituyó los Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI).

Con la información derivada de 39 réplicas del ENTRI desarrollados en los ciclos agrícolas O-I2012-13 y 2013-14 y que abarcan 39 condiciones de producción distribuidas en las tres principales regiones productoras de riego del país: Noroeste (Baja California Norte, Sonora y Sinaloa), Norte (Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas) y El Bajío (Guanajuato, Jalisco y Oaxaca), se evaluó el comportamiento del rendimiento de grano de 16 genotipos de trigos, ocho cristalinos y ocho harineros, con el propósito de caracterizar la variabilidad ambiental presente en entre y dentro de regiones de riego e identificar genotipos con adaptabilidad y adaptación para ambas especies.

3.2. REVISIÓN DE LITERATURA

3.2.1. Concepto de estabilidad de rendimiento

La estabilidad fenotípica tiene dos conceptos de interpretación principales: la estática (Tipo 1 o biológica) y la dinámica (Tipo 2 o agronómica). La estabilidad estática hace referencia a un rendimiento constante a pesar de la variación ambiental, expresando no desviación en el carácter de interés, por lo que la varianza entre ambientes es cero; es comúnmente asociado con bajos rendimientos en ambientes donde otros cultivares tienen altos rendimientos (Becker y Leon, 1988; Becker, 1981; Lin *et al.*, 1986). El segundo concepto de estabilidad hace referencia a un rendimiento acorde al rendimiento promedio del ambiente, de esta manera, un genotipo estable tendrá un rendimiento promedio paralelo al índice ambiental, implicando nula Interacción Genotipo por Ambiente (IGA) (Figura 2.1) (Annicchiarico, 2002; Becker y Leon, 1988). La estabilidad dinámica depende de los genotipos probados, ya que la media de los genotipos es usada como una respuesta estándar en cada ambiente, por lo que la respuesta de todos los genotipos puede ser considerada como un efecto ambiental, no así el caso de la estabilidad estática (Becker y León, 1988; Lin *et al.*, 1986). La estabilidad estática depende en gran parte de los ambientes de prueba, si el número de ambiente es muy grande y heterogéneo puede que la información no sea muy valiosa a diferencia de que si se analiza en un grupo de ambientes restringidos geográficamente (Lin *et al.*, 1986). Un tercer concepto, también conocido como Tipo 3, hace referencia a un genotipo estable, en donde se indica que es aquel que tenga un cuadrado medio de desviaciones de regresión pequeño (Lin *et al.*, 1986). Posteriormente Lin y Binns (1988) propusieron

un cuarto parámetro de estabilidad basado en la variación de un genotipo en la misma localidad pero diferentes años.

El tipo de estabilidad a considerar depende de que característica se desea analizar. Becker y León (1988) mencionan que el Tipo 1 es útil cuando se analizan características que deben ser mantenidos a toda costa, como características de calidad, resistencia a enfermedades o ciertos estreses bióticos. Este concepto de estabilidad tiene una interpretación menos ambigua que la del Tipo 2, donde la inestabilidad de rendimiento se debe a características genéticas que lógicamente confieren alta estabilidad (un cultivar más resistente a estrés biótico o abiótico probado con varios cultivares susceptibles en un ambiente con el mismo estrés, mostraría mayor IGA y por lo tanto baja estabilidad en Tipo 2)(Annicchiarico, 2002).

En el caso del rendimiento el objetivo es identificar cultivares con altos rendimientos y a la vez estables, sin embargo la estabilidad Tipo 1 es asociado con bajos rendimientos, por esto la estabilidad dinámica es más recomendada para estos estudios.

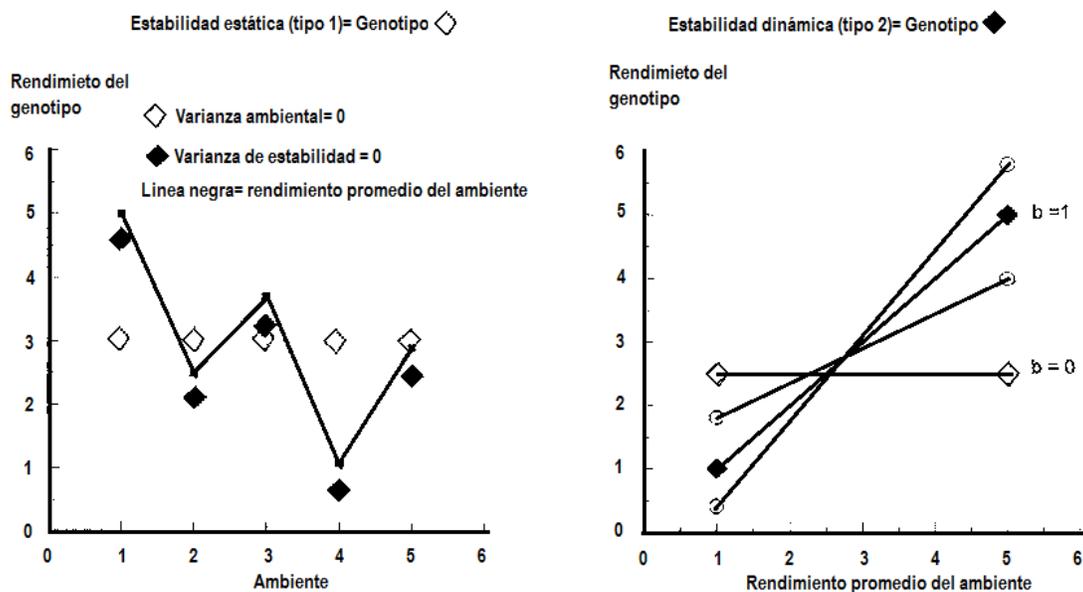


Figura 2.1. Estabilidad estática y dinámica.

3.2.2. Evaluación de la estabilidad y consistencia

Como se mencionó anteriormente, la evaluación del comportamiento agronómico de los cultivares generados en diferentes ambientes es de gran importancia para el fitomejoramiento, ya que es posible observar el comportamiento de una serie de genotipos en ambientes heterogéneos, a fin de identificar aquellos con una adaptación específica o amplia (Eberhart y Russell, 1966; Tai, 1971; Rodríguez *et al.*, 2002). La inestabilidad fenotípica de un genotipo al cambiar de un ambiente a otro es comúnmente conocida como IGA; dicha interacción complica la identificación de los mejores genotipos, ya que el desempeño de estos puede ser superior en unos ambientes e inferior en otros, cambiando el ordenamiento de los mejores (Eberhart y Russell, 1966). La inconsistencia en la estabilidad de rendimientos en diferentes regiones por IGA se puede reducir estratificando los ambientes. El fitomejorador debe subdividir en regiones donde los ambientes son similares, basado en diferencias macroambientales como los factores abióticos y/o bióticos (Eberhart y Russell, 1966). Las diferencias entre ambientes generada por la variabilidad de las condiciones bióticas y abióticas puede cambiar la magnitud de la respuesta de los cultivares.

Existen muchas maneras de medir la estabilidad de una característica fenotípica, la metodología estará en función del concepto de estabilidad deseado. Lin *et al.* (1986) evaluaron nueve parámetros de estabilidad, divididos en cuatro grupos; en el grupo A son los análisis de estabilidad estática medida como la varianza mínima de un genotipo a través de los ambientes, para esto se utilizan estadísticas simples como desviación estándar (S_i) y coeficiente de variación (CV) (Francis y Kannenberg, 1978). El CV es una estadística muy valiosa si se busca encontrar genotipos de muy alto rendimiento y con

pequeña varianza fenotípica a través de ambientes (CV<20% p.ej. sería lo ideal); sin embargo como ya se mencionó antes, los genotipos estables bajo este concepto por lo general son de rendimiento muy bajo. La ecuación de este método es definida como:

$$CV=(S_i/\bar{x}_i) \times 100$$

Donde S_i es la desviación estándar, y \bar{x} es la media.

En los grupo B y C están los análisis de estabilidad dinámica que definen a un genotipo estable como aquel que su respuesta es paralela a la media del índice ambiental. El grupo B está basado en los efectos de interacción genotipo por ambiente y su suma de cuadrados (Plaisted y Peterson, 1959; Plaisted, 1960; Shukla, 1972; Wricke, 1962). Lin *et al.* (1986) mencionan que los cuatro parámetros incluidos en este grupo son equivalentes cuando se pretende hacer un ranking de los genotipos; el grupo C puede depender del efecto promedio de los genotipos o la IGA y se basa en el coeficiente de regresión (Finlay y Wilkinson, 1963; Perkins y Jinks, 1968); en este grupo destaca el coeficiente de regresión (β_i) descrito por Finlay y Wilkinson (1963) y posteriormente por Eberhart y Russell (ER) (1966), el cual se deriva del siguiente modelo:

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

Y_{ij} es la media de la variedad i en j ambientes ($i= 1,2,\dots,v$; $j= 1,2,\dots,n$), μ_i es la media de la variedad i en todos los ambientes, β_i es el coeficiente de regresión que mide la respuesta de la variedad i en ambientes, δ_{ij} es la desviación de la regresión de la variedad i en j ambientes, I_j es el índice ambiental obtenido como las medias de los j ambientes menos la gran media.

Para obtener el coeficiente de regresión, es indispensable calcular el índice ambiental (I_j); el cual se define como:

$$I_i = (\sum_j Y_{ij}/v) - (\sum_i \sum_j Y_{ij}/vn), \sum_j Y_j = 0$$

Donde Y_{ij} es la media de la variedad i en j ambientes ($i= 1,2,\dots,v; j= 1,2,\dots,n$)

Una vez conocido el índice ambiental, es posible estimar la b_i :

$$b_i = \sum_j Y_{ij} I_j / \sum_j I_j^2$$

Rodríguez (2002) menciona que la b_i y la metodología de varianzas de Shukla (1972), concuerdan en la identificación de los genotipos estables; por lo que se recomienda usar b_i o varianzas de Shukla para evaluar la estabilidad dinámica de los genotipos.

Del modelo descrito por ER (1966) también se deriva el parámetro de estabilidad correspondiente al grupo D mencionado por Lin *et al.* (1986), y este corresponde a la s_{di}^2 . Esta estadística sirve para predecir el comportamiento de una variedad, usando:

$\hat{Y}_{ij} = \hat{x}_i + b_i I_j$, donde \hat{x}_i es el estimador de μ_i . La desviación $\hat{\delta}_{ij} = (Y_{ij} - \hat{Y}_{ij})$ puede ser elevada al cuadrado y sumada para dar otro parámetro estimador de la estabilidad (σ_{di}^2):

$$s_{di}^2 = [\sum_j \hat{\delta}_{ij}^2 / (n-2)] - s_e^2 / r$$

Donde s_e^2 / r es el estimador del error agrupado y:

$$\sum_j \hat{\delta}_{ij}^2 = \left\{ \sum_j Y_{ij}^2 - \frac{Y_i^2}{n} \right\} - (\sum_j Y_{ij}^2 I_j) / \sum_j I_j^2$$

Este modelo provee una media de la partición de la IGA de cada variedad en dos partes: 1) La variación debido a la respuesta de una variedad a los cambiantes índices ambientales, y 2) a las inexplicables desviaciones de la regresión en los índices ambientales.

Un cultivar estable no necesariamente tendrá un alto rendimiento o viceversa, por lo que la selección o recomendación de un genotipo se complica. Si en una evaluación

comparamos un genotipo “estable” pero con un rendimiento muy bajo contra uno de mayor rendimiento en todos los ambientes pero “inestable”, la elección sería obviamente por el segundo. Para evitar estas complicaciones se ha acuñado el término “rendimiento fiable” para hacer referencia a un genotipo estable y de alto rendimiento (Annicchiarico, 2002). El uso del término rendimiento fiable facilita la selección o identificación de un genotipo debido a que se considera tanto la estabilidad como altos rendimientos. Este índice puede ser relacionado tanto con el concepto estático o dinámico de estabilidad (Annicchiarico, 2002). Para identificar cultivares con estas características es factible utilizar la clasificación Finlay y Wilkinson (1963) que contiene siete clases, basadas en b_i y el rendimiento de los genotipos (Figura 2.2) o la creada por Márquez-Sánchez y Cordova (1976). En esta última clasificación se utilizan los parámetros de estabilidad definidos por ER (1966) y el rendimiento, creando un total de 18 categorías, donde acuñan el término sensible para una variedad con $b_i=1$ (adaptable), supersensible para $b_i>1$ y subsensible para $b_i<1$. Las desviaciones de regresión son utilizadas para ver la predecibilidad del rendimiento en un ambiente determinado, siendo $\sigma_{di}^2=0$ un valor de un genotipo predecible y $\sigma_{di}^2 >0$ subpredecible. A su vez utilizaron el rendimiento promedio (μ_i) de cada genotipo, clasificándolo en alto, intermedio y bajo (Cuadro 2.1).

Las categorías 1, 2, 3, 8, 9, 14 y 15 de Márquez-Sánchez y Cordova (1976) son equivalentes a las 7 clases de Finlay y Wilkinson (1963).

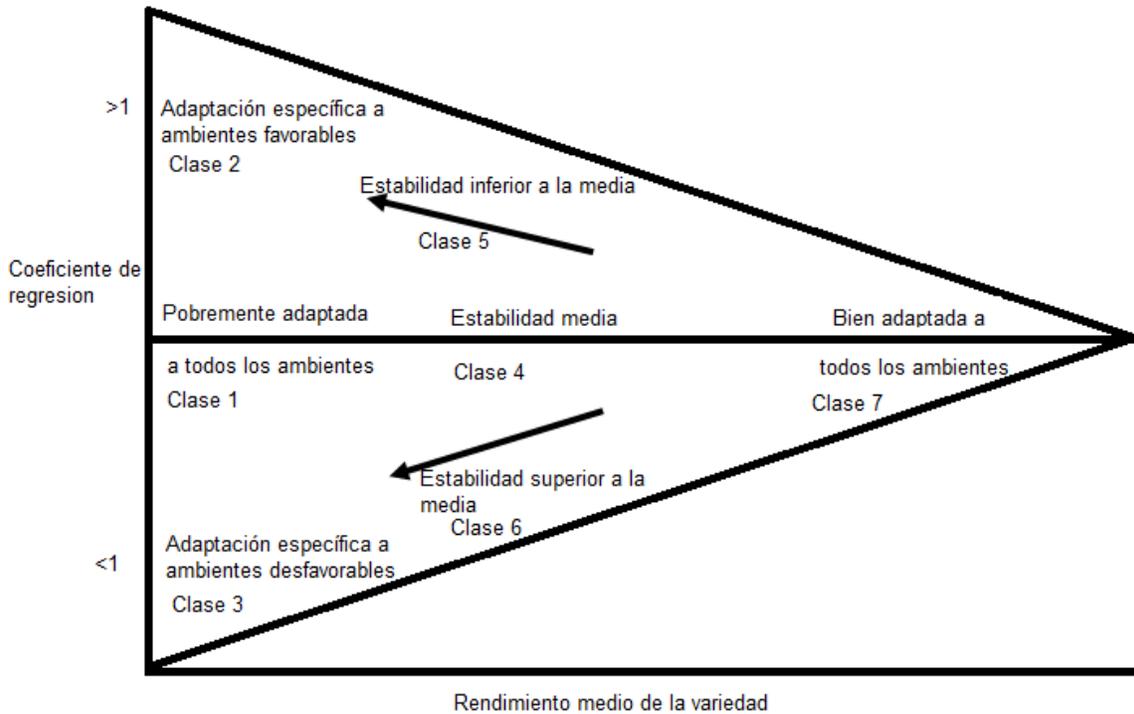


Figura 2.2. Interpretación de las variedades en función de su coeficiente de regresión y rendimiento medio de la variedad según Finlay y Wilkinson (1963).

3.2.3. Métodos multivariados para la evaluación de la Interacción Genotipo por Ambiente

En la actualidad el empleo de métodos multivariados como el análisis de efectos principales aditivos e interacción multiplicativas (AMMI) y el de regresión de sitios (SREG) facilitan la evaluación de la IGA; ya que estos permiten la evaluación visual del comportamiento de los genotipos a través de diversos ambientes mediante una representación gráfica (biplot) obtenida a partir de los dos primeros componentes principales.

Cuadro 2.1. Clasificación de las variedades por sensibilidad y predictibilidad (Márquez y Córdoba 1976).

Categoría	μ_i	b_i	σ_{di}^2	descripción
1	Alta	=1	=0	Sensibles, predecibles
2	Intermedia	=1	=0	
3	Baja	=1	=0	
4	Alta	=1	>0	Sensibles, subpredecibles
5	Intermedia	=1	>0	
6	Baja	=1	>0	
7	Alta	>1	=0	Supersensibles, predecibles
8	intermedia	>1	=0	
9	Baja	>1	=0	
10	Alta	>1	>0	Supersensibles, subpredecibles
11	Intermedia	>1	>0	
12	Baja	>1	>0	
13	Alta	<1	=0	Subsensibles, predecibles
14	Intermedia	<1	=0	
15	Baja	<1	=0	
16	Alta	<1	>0	Subsensibles, subpredecibles.
17	Intermedia	<1	>0	
18	baja	<1	>0	

El AMMI es un método utilizado comúnmente para evaluar la IGA, ya que describe de mejor manera que un ANOVA dicha interacción y permite interpretarla mejor que una simple regresión de la media de cada sitio debido a que puede ser modelada en más de una dimensión (Vargas *et al.*, 1999). Este método combina las técnicas de un ANOVA (lineal) y el análisis de componentes principales (bilineal) en un solo modelo, donde el primero permite estudiar los efectos principales de los genotipos y ambientes, y el segundo analiza la IGA mediante un análisis de componentes principales (ACP) (Gauch, 2006). Su modelo es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{kj} + e_{ij}$$

Y_{ij} es la media del genotipo i -ésimo en el ambiente j -ésimo; μ = media general; G_i = efecto del i -ésimo genotipo; E_j =efecto del j -ésimo ambiente; λ_k = raíz cuadrada del vector característico del k -ésimo eje del ACP; α_{ik} = valores del ACP para el k -ésimo eje del i -ésimo genotipo, respectivamente; γ_{ij} = valores del ACP para el k -ésimo eje del j -ésimo ambiente; e_{ij} = es el error aleatorio.

El AMMI no solo permite estimar la estabilidad, si no evaluar entre localidades y por consiguiente clasificar los ambientes (Crossa *et al.*, 1990; Alejos *et al.*, 2006). Este método no es sensible al caso de ocurrencia entrecruzamiento en la respuesta de genotipos en ambientes, su punto fuerte son los ensayos multiambientes debido a que captura gran proporción de la suma de cuadrados de la IGA (Gauch, 1992).

La interpretación del comportamiento de los genotipos en los diferentes ambientes dentro de un biplot AMMI, consiste en observar la posición que guardan uno respecto al otro; si un genotipo se encuentra sobre la misma dirección de un ambiente, ya sea sobre la flecha o en un ángulo no mayor a 90° dentro del biplot, indica relación positiva en el desempeño del genotipo sobre dicho ambiente. Si la posición entre ellos dentro del biplot es opuesta, la relación es negativa. En el biplot también se pueden distinguir que los ambientes se encuentran delimitados por líneas punteadas de color negro, estos sectores son mega-ambientes y agrupa a ambientes donde el comportamiento de los genotipos es similar, y corresponden a cada vértice del polígono, donde se encuentra el genotipo más sobresaliente de cada mega-ambiente.

El modelo de regresión de sitios (SREG), es un método similar al AMMI con la variación que los términos lineales son adicionados al termino multiplicativo de la interacción genotipo*ambiente (Yan *et al.*, 2000) su modelo es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + E_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{ij} + e_{ij}$$

Y_{ij} es la media del genotipo i -ésimo en el ambiente j -ésimo; μ = media general; G_i = efecto del i -ésimo genotipo; E_j =efecto del j -ésimo ambiente; λ_k = raíz cuadrada del vector característico del k -ésimo eje del ACP; α_{ik} = valores del ACP para el k -ésimo eje del i -ésimo genotipo, respectivamente; γ_{ij} = valores del ACP para el k -ésimo eje del j -ésimo ambiente; e_{ij} = es el error aleatorio.

El biplot generado por el modelo del SREG es conocido como GGE de debido a que el modelo incluye tanto el efecto del genotipo (G) como la interacción genotipo*ambiente (GE). El primer componente principal (CP1) del biplot representa la porción del rendimiento que se debe a las características del genotipo y el segundo (CP2) la parte del rendimiento debido a la IGA (Yan *et al.*, 2000). Por lo tanto genotipos con altos valores de CP1 tienen a tener rendimientos por superior al promedio, y serían estables en caso de tener valores cercanos a cero en el CP2. Los genotipos cercanos entre sí representan que su respuesta es similar entre los ambientes (Yan *et al.*, 2000). Si el ángulo del vector de un ambiente es menor de 90° respecto a un genotipo, quiere decir que ese genotipo tiene un rendimiento superior a la media en ese ambiente. Lo valioso de este método es que agrupa ambientes y genotipos con similar desempeño, y a su vez permite identificar gráficamente al genotipo con mayor potencial en cada subgrupo de ambientes (Salas *et al.*, 2009). Al igual que en el AMMI, en el SREG también se crean mega-ambientes.

En este trabajo se recurrió a la base de datos de 16 genotipos de trigos cristalinos y harineros en 39 Ensayos Nacionales de Trigo de Riego (ENTRI) del Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, distribuidos en las tres principales regiones productoras de riego del país: Noroeste (Baja

California Norte, Sonora y Sinaloa), Norte (Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas) y El Bajío (Guanajuato, Jalisco y Oaxaca); contrastando regiones, años, niveles de riego y fechas de siembra.

El objetivo del presente fue analizar la diversidad ambiental presente en los ENTRI sobre el comportamiento de los genotipos de trigo cristalino y harinero; así como evaluar en los agrupamientos: general, riego normal, reducido y por región, la estabilidad y consistencia de los rendimientos de los genotipos de trigo cristalino y harinero a fin de identificar aquellos con un rendimiento fiable. Para alcanzar dichos objetivos se utilizaron los análisis: coeficiente de variación (CV), parámetros de Eberhart y Russell (1966) apoyada con la clasificación de Márquez y Córdova (1976), y con los análisis multivariados AMMI y SREG.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Sitios experimentales

Los experimentos se establecieron en 39 ambientes (Cuadro 2.2) en los ciclos de invierno-primavera 2012-2013 y 2013-2014, agrupados en tres regiones trigueras; Noroeste: Mexicali, B.C.N., Cd. Obregón, Son, Los Mochis, Sin.; Norte: Delicias, Chih., Río Bravo, Tmp., Zaragoza, Coah.; y Bajío (Bajío): La Barca, Jal., Roque, Gto., Yanhuitlán, Oax. Los experimentos se establecieron bajo diferentes situaciones tales como: niveles de riego, normal y reducido; fechas de siembra; y no en todos los casos incluyeron ambos ciclos de evaluación como en Yanhuitlán, Oax., en La Barca, Jal. y en Delicias, Chih. El diseño experimental utilizado en estos sitios fue bloques al azar. El nivel de riego normal consistió en cuatro riegos de auxilio durante el ciclo de cultivo y el nivel de riego reducido o reducido de tres, eliminando el último riego en la etapa de llenado de grano.

3.3.2. Genotipos

En cada sitio se evaluaron 16 genotipos (Cuadro 2.3), ocho de trigo harinero: 'Borlaug 100 F2014', 'Kronstad F2004', 'Roelfs F2007', 'Tacupeto F2001', 'Urbina S2007' y 'Villa Juárez F2009' y las líneas avanzadas 'V11' y 'V13', y ocho de trigo cristalino: 'Anatoly C2011', 'Cevy Oro C2008', 'Cirno C2008', 'Gema C2004', 'Movas C2009' y 'Sáwali Oro C2008' y las líneas avanzadas 'V12' y 'V15'.

3.3.3. Descripción de los ensayos y análisis de datos

Las siembras y manejos agronómicos se realizaron conforme a las recomendaciones del INIFAP propias de cada localidad, a excepción de la segunda fecha de siembra que se utilizó como otro factor de variación en Cd. Obregón y Roque. En cada sitio, la variable evaluada fue el rendimiento de grano expresado en toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) a partir de la cosecha de cada parcela experimental. Los métodos utilizados para evaluar la estabilidad, consistencia e IGA son: el coeficiente de variación (CV), parámetros de Eberthart y Russell (b_i y σ_{di}^2) (1966), y con los análisis multivariados AMMI y SREG, ambos generan un biplot con los dos primeros componentes principales, con los cuales el modelo explica el $\geq 50\%$ de la variabilidad. Los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico GEA-R (Pacheco *et al.*, 2015), mismo que permite conocer mediante una prueba de hipótesis aquellos genotipos con mayor rendimiento y menor coeficiente de variación, $b_i=1$, $\sigma_{di}^2=0$, además de los biplots de AMMI y SREG.

Cuadro 2.2. Descripción de los sitios experimentales.

No. sitio	Ciclo agrícola	Nombre completo de localidad Incluyendo condición de riego
1	2012-13	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Limitado
2	2012-13	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Normal
3	2012-13	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Limitado
4	2012-13	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Normal
5	2013-14	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Limitado
6	2013-14	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Normal
7	2013-14	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Limitado
8	2013-14	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Normal
9	2012-13	Los Mochis, Sin. Riego Limitado
10	2012-13	Los Mochis. Riego Normal
11	2013-14	Los Mochis, Sin. Riego Limitado
12	2013-14	Los Mochis. Riego Normal
13	2012-13	Mexicali, B.C.N. Riego Limitado
14	2012-13	Mexicali, B.C.N. Riego Normal
15	2013-14	Mexicali, B.C.N. Riego Limitado
16	2013-14	Mexicali, B.C.N. Riego Normal
17	2012-13	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Limitado
18	2012-13	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Normal
19	2012-13	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Limitado
20	2012-13	Roque, Gto.2da Fecha Riego Normal
21	2013-14	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Limitado
22	2013-14	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Normal
23	2013-14	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Limitado
24	2013-14	Roque, Gto.2da Fecha Riego Normal
25	2012-13	La Barca, Jal. Riego Limitado
26	2012-13	La Barca, Jal. Riego Normal
27	2013-14	La Barca, Jal. Riego Normal
28	2013-14	Yanhuitlán, Oax. Riego Limitado
29	2013-14	Yanhuitlán, Oax. Riego Normal
30	2012-13	Delicias, Chih. Riego Limitado
31	2012-13	Delicias, Chih. Riego Normal
32	2012-13	Río Bravo, Tmp. Riego Limitado
33	2012-13	Río Bravo, Tmp. Riego Normal
34	2013-14	Río Bravo, Tmp. Riego Limitado
35	2013-14	Río Bravo, Tmp. Riego Normal
36	2012-13	Zaragoza, Coah. Riego Limitado
37	2012-13	Zaragoza, Coah. Riego Normal
38	2013-14	Zaragoza, Coah. Riego Limitado
39	2013-14	Zaragoza, Coah. Riego Normal

Cuadro 2.3. Genotipos utilizados para el análisis de estabilidad y consistencia con su respectivo número.

Trigos Cristalinos		Trigos Harineros	
Genotipos	#	Genotipos	#
Tacupeto F2001	1	Gema C2004	9
Kronstad F2004	2	Cirno C2008	10
Urbina S2007	3	Sáwali Oro C2008	11
Roelfs F2007	4	Cevy Oro C2008	12
Villa Juárez F2009	5	Anatoly C2011	13
Borlaug 100 F2014	6	Movas C2009	14
V12	7	V11	15
V13	8	V15	16

3.4. RESULTADOS

3.4.1. Estabilidad, consistencia e Interacción Genotipo por Ambiente de rendimientos de trigos cristalinos

A fin de identificar sólo aquellos genotipos con rendimiento fiable, se hará énfasis sólo en aquellos que se encuentren en el agrupamiento de mayor rendimiento estadístico. En virtud de lo anteriormente mencionado, los trigos más rendidores en el análisis general son 'V15', 'V11' y 'Anatoly C2011', en riego normal se les suma 'Cirno C2008' y en riego reducido a estos cuatro se les adiciona 'Gema C2004' y 'Sáwali Oro C2008'. En lo que respecta a los parámetros de estabilidad, 'V15', 'V11' y 'Anatoly C2011' son los genotipos de mayor rendimiento con CV más bajos en los tres agrupamientos, con la excepción de 'Anatoly C2011' en riego normal. Los genotipos estables según la bi de ER (1966) son: 'V15' y 'Anatoly C2011' en el agrupamiento general; en riego normal se agrega Cirno C2008, y en reducido a estas tres se les agrega 'V11' y 'Sáwali Oro C2008'. Para el otro parámetro de estabilidad de ER (1966), todos los genotipos son inconsistentes (Cuadro 2.4).

En el análisis por región, 'V15', 'V11' y 'Anatoly C2011' sobresalen en su rendimiento en las tres regiones; en El Bajío se suman 'Gema C2004' y 'Sáwali Oro C2008', en el noroeste 'Cirno C2008' y 'Sáwali Oro C2008', y en el Norte solo no sobresale 'Sáwali Oro C2008'. En la región de El Bajío, los genotipos con menor coeficiente de variación son 'Anatoly C2011' y 'Gema C2004'; en el Noroeste repite 'Anatoly C2011' con 'V15'; y en el Norte 'V15', 'V11' y 'Cevy Oro C2008'. En cuanto a los parámetros de ER (1966), 'V15', 'V11' y 'Anatoly C2011' son estables en todas las regiones, 'Cirno C2008' en el Noroeste y Norte, 'Cevy Oro C2008' y 'Gema C2004' en el Norte. Los genotipos 'Gema C2004' y

'Cevy Oro C2008' fueron los únicos consistentes, esto en la región Noroeste y Norte, respectivamente (Cuadro 2.5).

El cuadro 2.6 permite comprar como es el comportamiento de los genotipos dependiendo del ambiente basados en la clasificación propuesta por Márquez y Córdova (1976). Los genotipos 'V15' y 'Anatoly C2011' se ubicaron dentro de la misma clasificación (4) en todos los agrupamientos de ambientes, por lo que su comportamiento siempre fue alto, sensibles al cambio ambiental pero subpredecibles. Este mismo comportamiento lo exhibió Cirno C2008 en los agrupamientos de riego normal, reducido, Noroeste y Norte; V11 en riego reducido y en las 3 regiones. Los comportamientos de 'Gema C2004' y 'Cevy Oro C2008' variaron mucho a través de los diferentes agrupamientos; sin embargo por lo general fueron subsensibles al cambio ambiental; sin embargo 'Cevy Oro C2008' fue el único genotipo de alto rendimiento, sensible y predecible. Las variedades 'Sáwali Oro C2008' y 'Movas C2009' tuvieron un comportamiento irregular en cuanto a su rendimiento y estabilidad.

En lo que respecta a los análisis multivariados, la interpretación de los análisis AMMI y SREG en los agrupamientos general y por nivel de región no es muy clara, debido a la dispersión que se tienen por la cantidad de ambientes (Figuras 2.3 y 2.4). Lo rescatable de los biplots de AMMI mostrados en la Figura 2.4 para los agrupamientos de riego normal y reducido, es que los mega-ambientes están conformados por ambientes de las mismas regiones, esto es más fácil apreciarse en el biplot de riego normal. En ambos biplots, el mega-ambiente correspondiente a la mayor cantidad de ambientes de la región Noroeste, las variedades 'Cirno C2008' y 'Sáwali Oro C2008' muestra una interacción positiva; mientras que 'Gema C2004' y 'Anatoly C2011' para los de la región de El Bajío.

Cuadro 2.4. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos cristalinos en los agrupamientos general (G), riego normal (N) y reducido (R).

Genotipos	Media			Francis y Kannenberg			Eberhart y Russell					
	(ton ha ⁻¹)			CV (%)			b_i			σ_{di}^2		
	G	N	R	G	N	R	G	N	R	G	N	R
V15	5.23*	5.87*	4.55*	37.46 ¹	29.47 ¹	43.88 ¹	1.04 ²	1.00 ²	1.04 ²	-0.1	-0.1	-0.01
V11	5.09*	5.64*	4.51*	35.78 ¹	27.45 ¹	43.10 ¹	0.96	0.876	1.02 ²	-0.04	-0.01	-0.08
Anatoly C2011	5.03*	5.49*	4.54*	38.00 ¹	33.06	42.61 ¹	0.99 ²	1.04 ²	0.99 ²	0.04	0.03	0.07
Cirno C2008	4.82	5.45*	4.15*	41.68	34.18	47.75	1.05 ²	1.07 ²	1.01 ²	0.06	0.01	0.13
Gema C2004	4.80	5.32	4.25*	36.78	30.92	41.44	0.93	0.95 ²	0.91	-0.1	-0.1	0.01
Sáwali Oro C2008	4.79	5.28	4.28*	46.03	43.16	48.24	1.12 ²	1.26 ²	1.05 ²	0.38	0.51	0.193
Cevy Oro C2008	4.7	5.39	4.09	38.35	29.50	45.41	0.95	0.9	0.96	0.04	0.07	0.003
Movas C2009	4.58	5.06	4.09	39.40	31.71	46.83	0.95	0.91	0.99 ²	-0.01	-0.01	-0.01
DSH	0.32	0.50	0.11									

Diferencia significativa honesta (DSH). Tukey (0.05); *, rendimientos estadísticamente superiores; ¹; estadísticamente de mejor rendimiento y coeficiente de variación más bajo; ², estable.

Cuadro 2.5. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos cristalinos en los ambientes de las regiones de El Bajío (B), Noroeste (NO) y Norte (N).

Genotipos	Media			Francis y Kannenberg			Eberhart y Russell					
	(ton ha ⁻¹)			CV (%)			b_i			σ_{di}^2		
	B	NO	N	B	NO	N	B	NO	N	B	NO	N
V15	4.38*	6.54*	4.24*	47.35	19.51 ¹	37.89 ¹	1.07 ²	1.03 ²	1.07 ²	0.03	-0.02	-0.20
V11	4.59*	6.11*	4.10*	47.50	18.00	37.35 ¹	1.14 ²	0.90 ²	1.01 ²	-0.03	-0.09	-0.18
Anatoly C2011	4.59*	6.26*	3.63*	41.64 ¹	19.33 ¹	47.38	0.98 ²	0.98 ²	1.07 ²	0.049	-0.05	0.18
Cirno C2008	3.91	6.36*	3.56*	44.14	23.22	42.81	0.90	1.18 ²	0.96 ²	-0.04	0.07	0.02
Gema C2004	4.37*	5.97	3.49*	40.93 ¹	16.20	47.35	0.97	0.79	1.09 ²	0.06	-0.1 ³	-0.15
Sáwali Oro C2008	4.19*	6.43*	2.97	44.94	28.63	37.47	0.97	1.45	0.65	0.008	0.31	0.01
Cevy Oro C2008	3.97	5.85	4.04*	51.92	18.82	41.42 ¹	1.07 ²	0.83	1.13 ²	0.002	0.08	-0.3 ³
Movas C2009	3.76	5.89	3.57*	47.69	18.00	43.98	0.94 ²	0.82	0.99 ²	-0.08	0.07	0.05
DSH	0.48	0.47	0.81									

Diferencia significativa honesta (DSH). Tukey (0.05); *, rendimientos estadísticamente superiores; ¹; estadísticamente de mejor rendimiento y coeficiente de variación más bajo; ², estable; ³, consistente.

Para poder describir de mejor manera el comportamiento de los genotipos a través de los ambientes es necesaria la estratificación de estos. La mejor opción es agrupar ambientes de acuerdo a su región geográfica, ya que como se observa en el Cuadro 1.5, los rendimientos son diferentes entre las regiones y de cierta manera más homogénea dentro de ellas (Cuadro 1.6). El máximo nivel de especificidad de ambientes será hasta por región, ya que en el análisis de nivel de riego por región la información generada puede no resultar muy valiosa, ya que el efecto de los años se maximiza al reducir el número de ambientes (Figura 2.5).

Cuadro 2.6. Categorías del comportamiento de las variedades de trigo cristalino en los seis agrupamientos de ambiente según Márquez y Córdova (1976).

Genotipos	General	Normal	Reducido	El Bajío	Noroeste	Norte
V15	4	4	4	4	4	4
V11	16	16	4	4	4	4
Anatoly C2011	4	4	4	4	4	4
Cirno C2008	5	4	4	17	4	4
Gema C2004	17	5	16	16	14	4
Sáwali Oro C2008	5	5	4	16	10	18
Cevy Oro C2008	17	17	17	5	17	1
Movas C2009	18	18	5	5	17	4

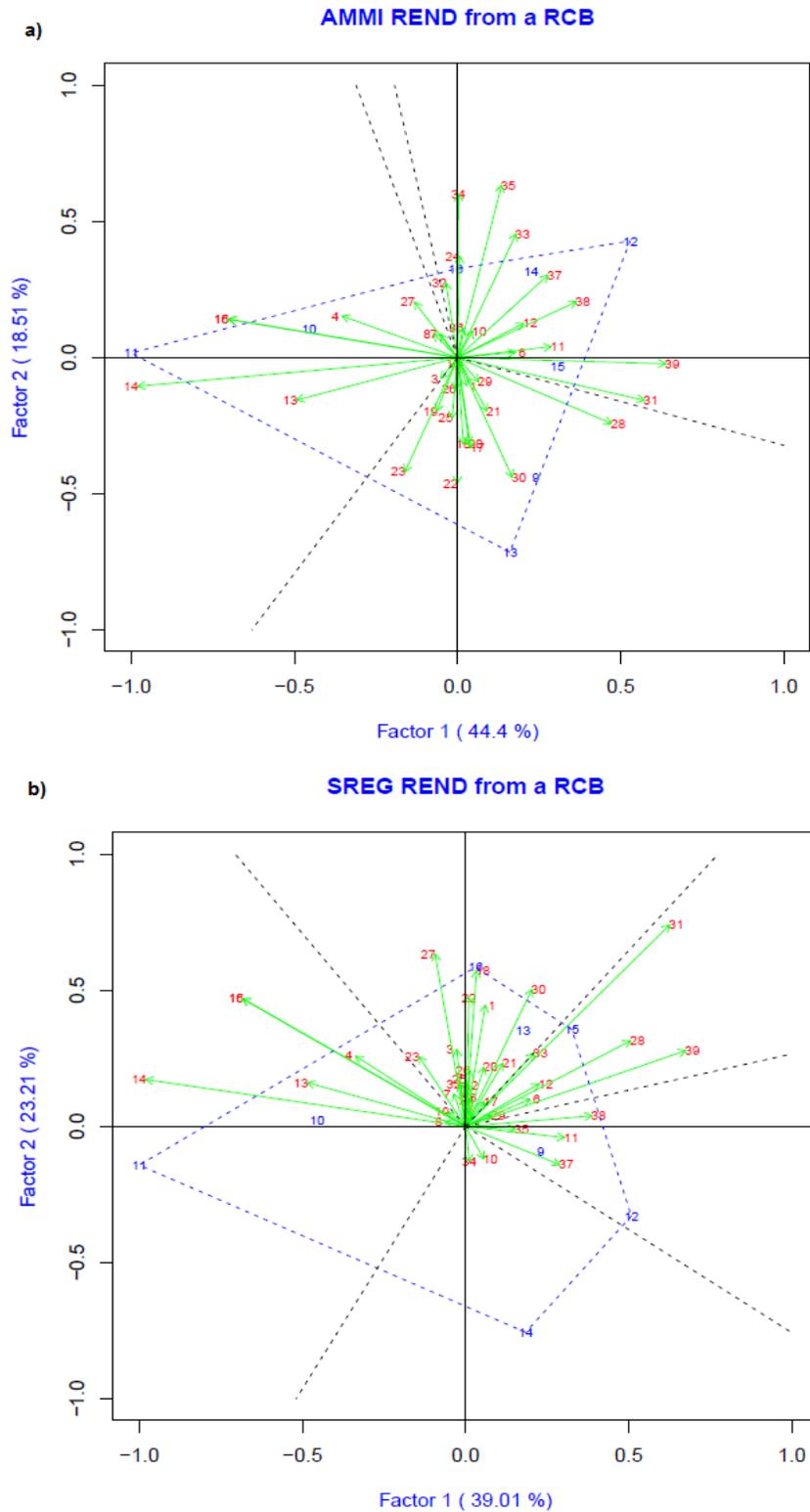


Figura 2.3. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos para el agrupamiento general.

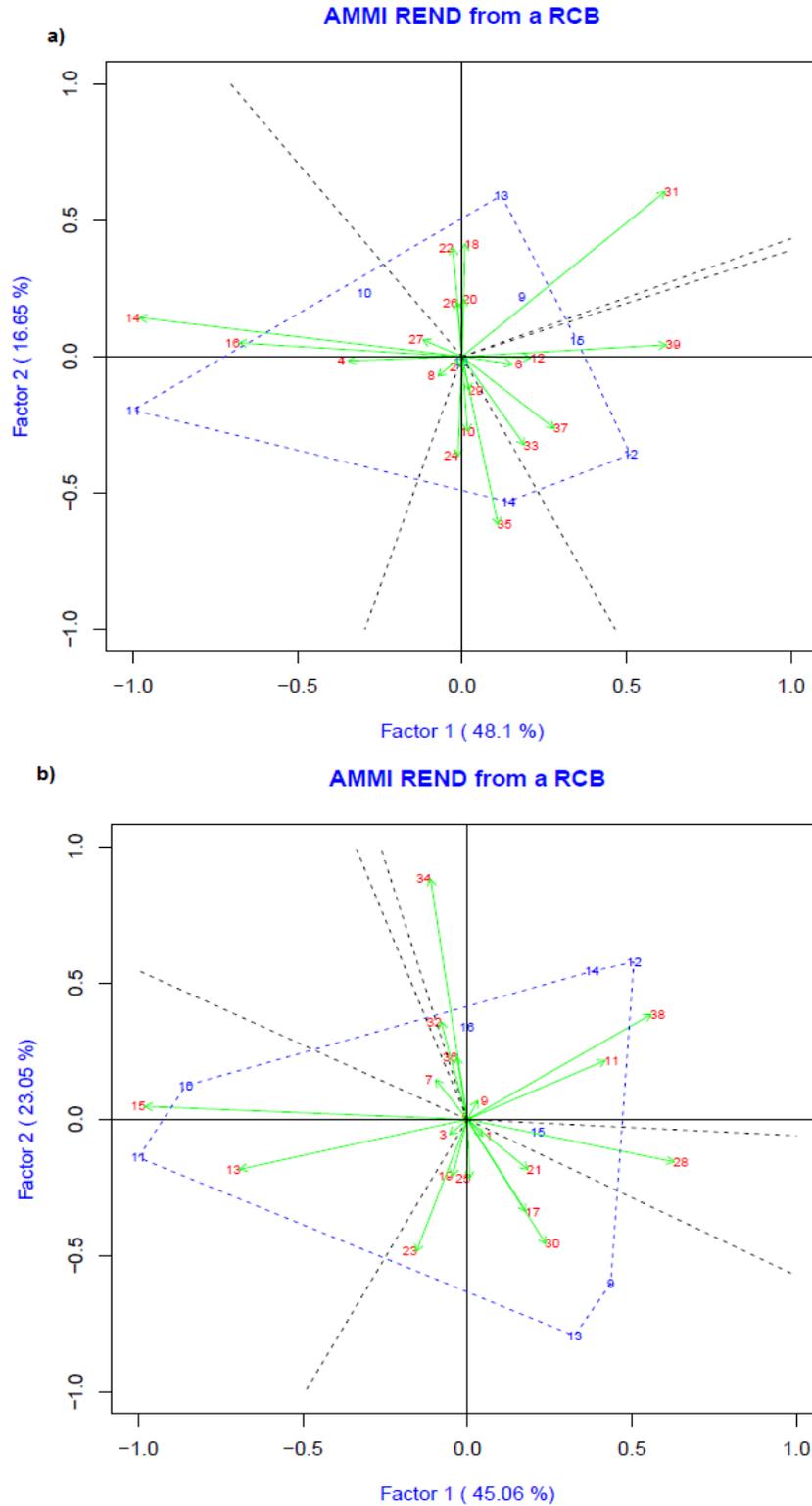


Figura 2.4. Representaciones gráficas de los análisis AMMI para los agrupamientos riego normal (a) y limitado (b) construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos.

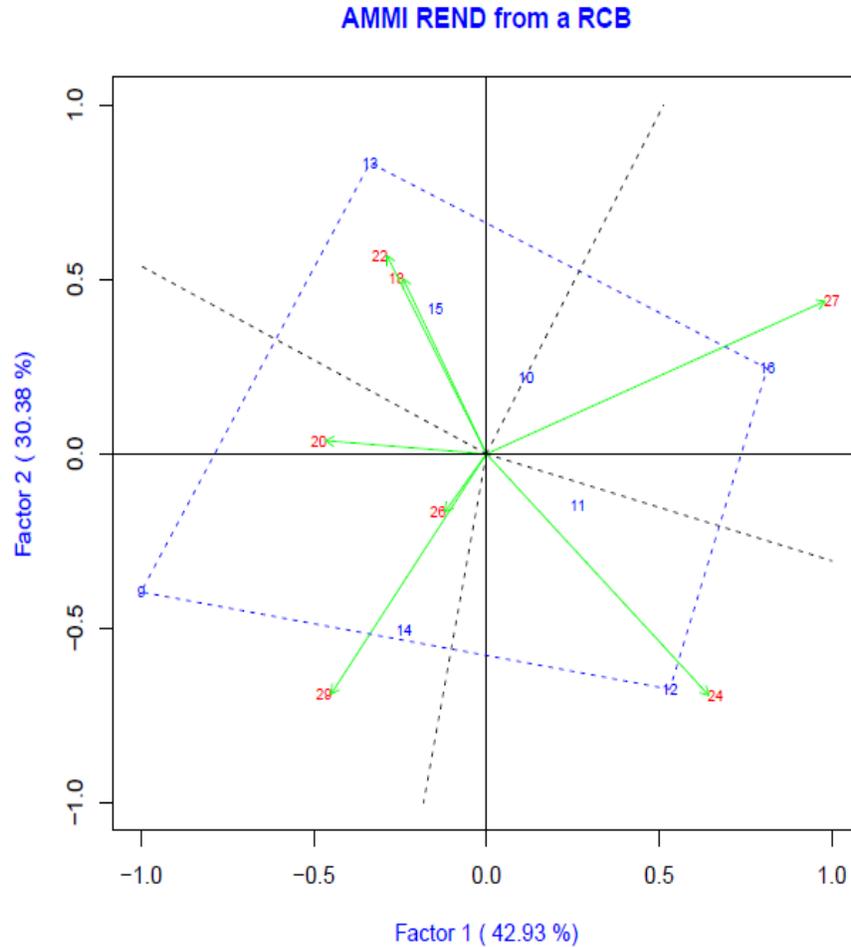


Figura 2.5. Representación gráfica del análisis AMMI para el agrupamiento de la región de El Bajío con riego normal, construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos.

Debido a que la ausencia de IGA (Cuadro 1.3) para trigos cristalinos en las regiones de El Bajío y Norte, los análisis AMMI y SREG no se realizaron para dichos agrupamientos.

En los biplots de AMMI y SREG correspondientes a la región noroeste los genotipos ‘Sáwali Oro C2008’ y ‘Cirno C2008’ presentan una tendencia favorable sobre los ambientes de Mexicali. Particularizando en el AMMI (Figura 2.6a), se observa un gran efecto de los años en la interacción, ya que los genotipos ‘Gema C2004’ y ‘Cevy Oro C2008’ interactúan favorablemente con los ambientes correspondientes al primer ciclo

de evaluación en la localidad de Cd. Obregón; mientras que las líneas avanzadas con los que corresponden al segundo ciclo. Los genotipos más estables al estar más cerca del origen son: 'V11', 'Gema C2004' y 'Anatoly C2011'. En el SREG (Figura 2.6b) la dispersión de los genotipos cambia, a diferencia de lo anteriormente mencionado sobre 'Sáwali Oro C2008' y 'Cirno C2008', se observa que gran parte de la dispersión de los ambientes va hacia los genotipos 'V15', 'Anatoly C2011' y 'V11', los cuales son los más sobresalientes.

3.4.2. Estabilidad, consistencia e Interacción Genotipo por Ambiente de rendimientos de trigos harineros

Al igual que en los trigos cristalinos, sólo se consideraran aquellos genotipos con rendimiento alto a fin de identificar los de rendimiento fiable. En los agrupamientos general, riego normal y reducido presentados en el Cuadro 2.7, sobresalen 'V13' y 'Borlaug 100 F2014'; estos dos genotipos son los de menor coeficiente de variación y mayor rendimiento, junto con 'V12, y estables según el primer parámetro de ER, a excepción de 'Borlaug 100 F2014' en riego normal. La variedad 'Roelfs F2007' fue la única consistente, esto en riego reducido.

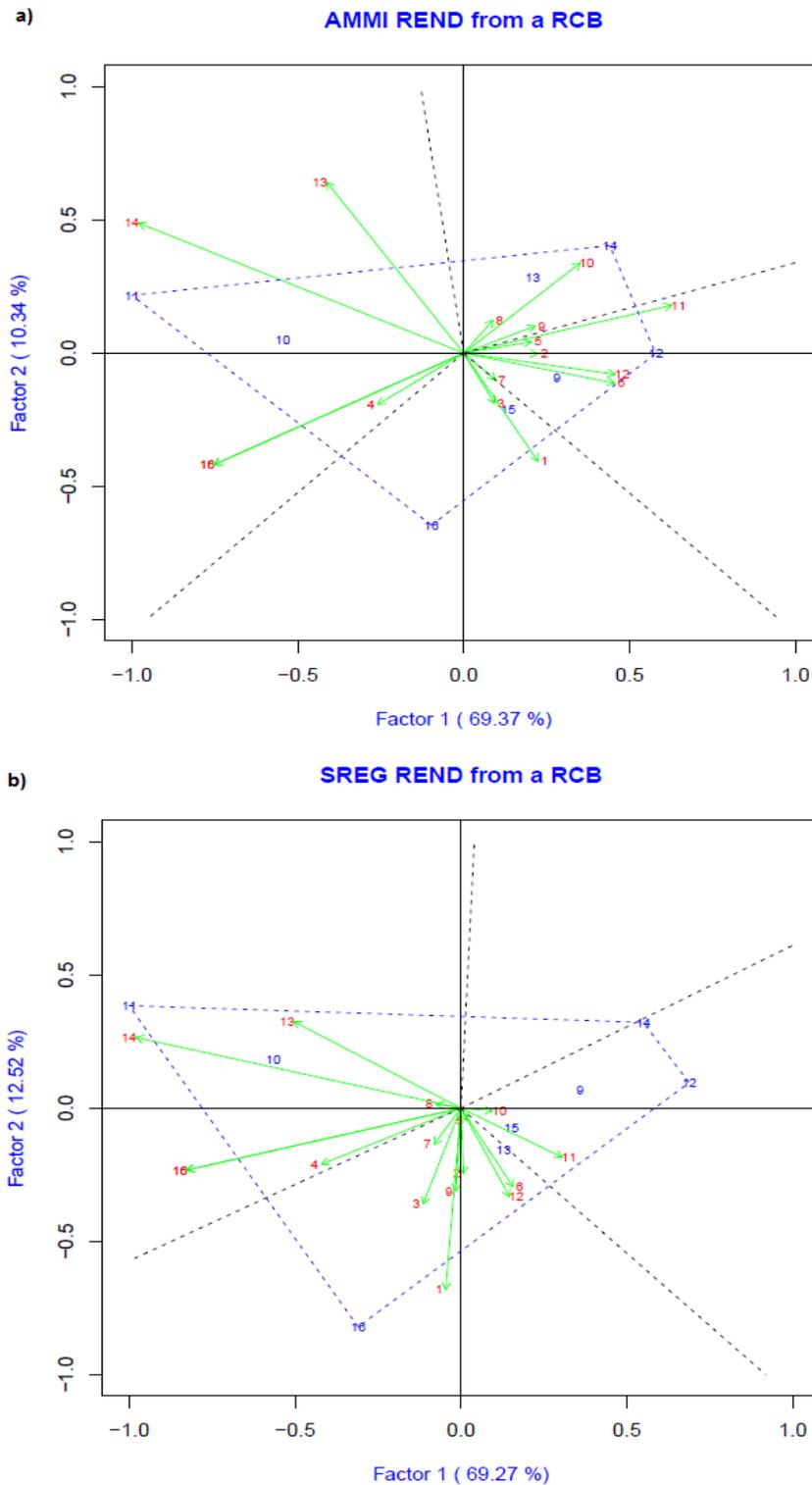


Figura 2.6. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos cristalinos en el análisis de los ambientes de la región del Noroeste.

Cuadro 2.7. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos harineros para los agrupamientos de ambiente: general (G), riego normal (N) y reducido (R).

Genotipos	Media (ton ha ⁻¹)			Francis y Kannenberg CV (%)			Eberhart y Russell					
	G	N	R	G	N	R	b_i			σ_{di}^2		
							G	N	R	G	N	R
V13	5.12*	5.66*	4.56*	37.71 ¹	30.60 ¹	44.19 ¹	1.05 ²	1.01 ²	1.09 ²	0.03	-0.02	0.09
Borlaug100 F2014	4.99*	5.51*	4.45*	35.62 ¹	26.59 ¹	43.83 ¹	0.95 ²	0.84	1.04 ²	0.13	0.01	0.22
V12	4.73	5.22	4.21	39.44 ¹	32.86 ¹	45.59 ¹	1.02 ²	0.99 ²	1.05 ²	0.02	0.02	0.03
Roelfs F2007	4.60	5.12	4.04	41.41	34.92	47.15	1.05 ²	1.04 ²	1.06 ²	-0.02	0.03	-0.07 ³
Villa Juárez F2009	4.59	5.09	4.07	42.58	39.71	43.98	1.04 ²	1.15 ²	0.94 ²	0.25	0.23	0.24
Kronstad F2004	4.54	5.10	3.9	39.22	34.31	41.99	0.95 ²	0.99 ²	0.87	0.17	0.13	0.21
Tacupeto F2001	4.38	4.88	3.85	46.24	37.96	54.83	1.07 ²	1.00 ²	1.14 ²	0.32	0.49	0.16
Urbina S2007	4.16	4.66	3.63	41.22	35.67	45.39	0.88	0.94 ²	0.79 ²	0.36	0.12	0.63
DSH	0.26	0.40	0.33									

Diferencia significativa honesta (DSH). Tukey (0.05); *, rendimientos estadísticamente superiores; ¹; estadísticamente de mejor rendimiento y coeficiente de variación más bajo; ², estable; ³, consistente.

En el análisis por región presentado en el Cuadro 2.8, 'V13' y 'Borlaug 100 F2014' sobresalieron por su rendimiento en todas las regiones, 'Villa Juárez F2009' en El Bajío y Noroeste, 'Tacupeto F2001' y 'Roelfs F2007' en el Noroeste y 'V12' en el Norte. La línea experimental 'V13' presentó bajos coeficientes de variación y buenos rendimientos en las tres regiones, 'Borlaug 100 F2014' en el Noroeste y Norte; 'Villa Juárez F2009' en El Bajío y Noroeste; 'Roelfs F2007' y Tacupeto F2001' en el Noroeste y 'Urbina S2007' en el Bajío. En lo que respecta a los parámetros de ER (1966), Las dos líneas experimentales junto con 'Borlaug 100 F2014' y 'Tacupeto F2001' son estables en las tres regiones; 'Villa Juárez F2009' en el Bajío y Noroeste. Todos los genotipos fueron inconsistentes según el segundo parámetro de ER (1966).

En el Cuadro 2.9 se observa de mejor manera la combinación entre los parámetros de estabilidad de ER (1966) y el rendimiento. Los genotipos 'V13' y 'Borlaug 100 F2014' se encuentran en la clasificación número 4 en gran parte de los agrupamientos, haciendo referencia a que son de alto rendimiento, sensibles al cambio ambiental pero subpredecibles. 'V12' siempre fue sensible al cambio ambiental, subpredecible pero de rendimiento medio, a excepción de la región Norte, donde exhibió alto rendimiento. Los demás genotipos tuvieron un rendimiento entre medio y bajo y variaron en su respuesta al cambio ambiental. Cabe destacar a 'Roelfs F2007' debido a que fue el único genotipo predecible, esto en el agrupamiento de riego reducido.

Cuadro 2.8. Índices de estabilidad fenotípica de rendimiento de trigos harineros en los ambientes de las regiones de El Bajío (B), Noroeste (NO) y Norte (N).

Genotipos	Media (ton ha ⁻¹)			Francis y Kannenberg CV (%)			Eberhart y Russell					
	B	NO	N	B	NO	N	b_i			σ_{di}^2		
							B	NO	N	B	NO	N
V13	4.41*	6.61*	3.67*	33.23 ¹	24.13 ¹	35.25 ¹	1.13 ²	1.13 ²	1.07 ²	0.09	-0.05	0.10
Borlaug 100 F2014	4.25*	6.31*	3.86*	35.14	23.02 ¹	32.67 ¹	1.16 ²	0.97 ²	1.05 ²	0.07	0.14	0.09
V12	3.97	6.14	3.47*	35.42	24.85	41.40	1.09 ²	1.08 ²	1.22 ²	0.03	-0.1	0.04
Roelfs F2007	3.75	6.26*	3.04	33.43	21.45 ¹	41.49	0.99 ²	0.93	1.08 ²	-0.06	-0.03	-0.02
Villa Juárez F2009	4.17*	6.20*	2.58	33.24 ¹	23.18 ¹	35.04	1.05 ²	0.95 ²	0.72	0.12	0.20	0.05
Kronstad F2004	3.80	5.98	3.21	24.87	27.20	36.46 ¹	0.71	1.07 ²	0.96 ²	0.01	0.30	0.1
Tacupeto F2001	3.09	6.19*	3.15	41.06	23.03 ¹	43.30	0.85 ²	0.98 ²	1.16 ²	0.42	0.05	0.04
Urbina S2007	3.98	5.35	2.48	32.37 ¹	28.18	34.13	1.01 ²	0.88 ²	0.71	-0.02	0.68	-0.04
DSH	0.42	0.45	0.48									

Diferencia significativa honesta (DSH). Tukey (0.05); *, rendimientos estadísticamente superiores; ¹; estadísticamente de mejor rendimiento y coeficiente de variación más bajo; ², estable.

Cuadro 2.9. Clasificación de las variedades de trigo harinero en los seis agrupamientos de ambiente según Márquez y Córdova (1976).

Genotipos	General	Normal	Reducido	El Bajío	Noroeste	Norte
V13	4	4	4	4	4	4
Borlaug 100 F2014	4	16	4	4	4	4
V12	5	5	5	5	5	4
Roelfs F2007	5	5	2	5	16	6
Villa Juárez F2009	5	5	5	4	4	18
Kronstad F2004	5	5	17	17	5	5
Tacupeto F2001	6	6	6	6	4	5
Urbina S2007	18	6	6	5	6	18

Al igual que en los trigos cristalinos, la interpretación de los biplot de AMMI y SREG en los agrupamientos general, riego normal y limitado es muy complicada debido a la cantidad de ambientes evaluados; por lo que se usara el mismo criterio de análisis hasta por región. A diferencia de lo obtenido en los análisis en trigos cristalinos, para ambos niveles de riego, en trigos harineros no se observa un patrón de ordenamiento de ambientes de la misma región dentro de los mega-ambientes (Figura 2.7a y b).

En el Análisis AMMI de la región Bajío presentado en la Figura 2.8a, se observa como los genotipos ‘Tacupeto F2001’ y ‘Roelfs F2007’ tienen una interacción favorablemente con los ambientes correspondientes a La Barca, ‘Kronstad F2004’ con los ambientes de Yanhuatlán y Roque segunda fecha de siembra para ambos ciclos; los demás ambientes correspondientes a este lugar interactúan favorablemente con los genotipos restantes. En el SREG, dos mega-ambientes agrupan a la mayor parte de los ambientes, y que por cercanía en ubicación dentro del biplot, los genotipos ‘Villa Juárez F2009’, ‘Borlaug 100 F2014’, ‘V12’ y ‘V13’ son los más sobresalientes en dichos mega-ambientes (Figura 2.8b).

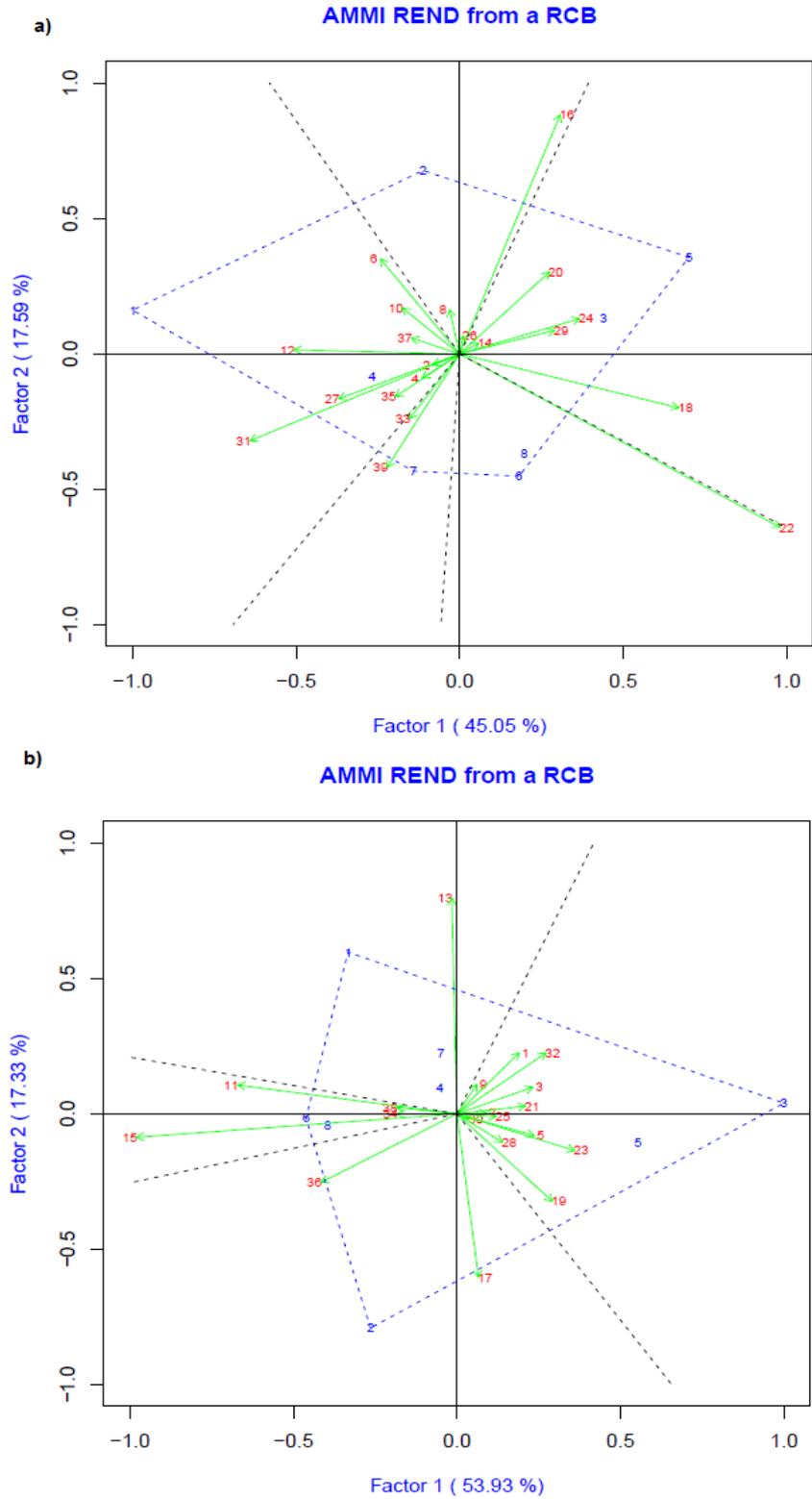


Figura 2.7. Representaciones gráficas de los análisis AMMI para los agrupamientos riego normal (a) y limitado (b) construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros.

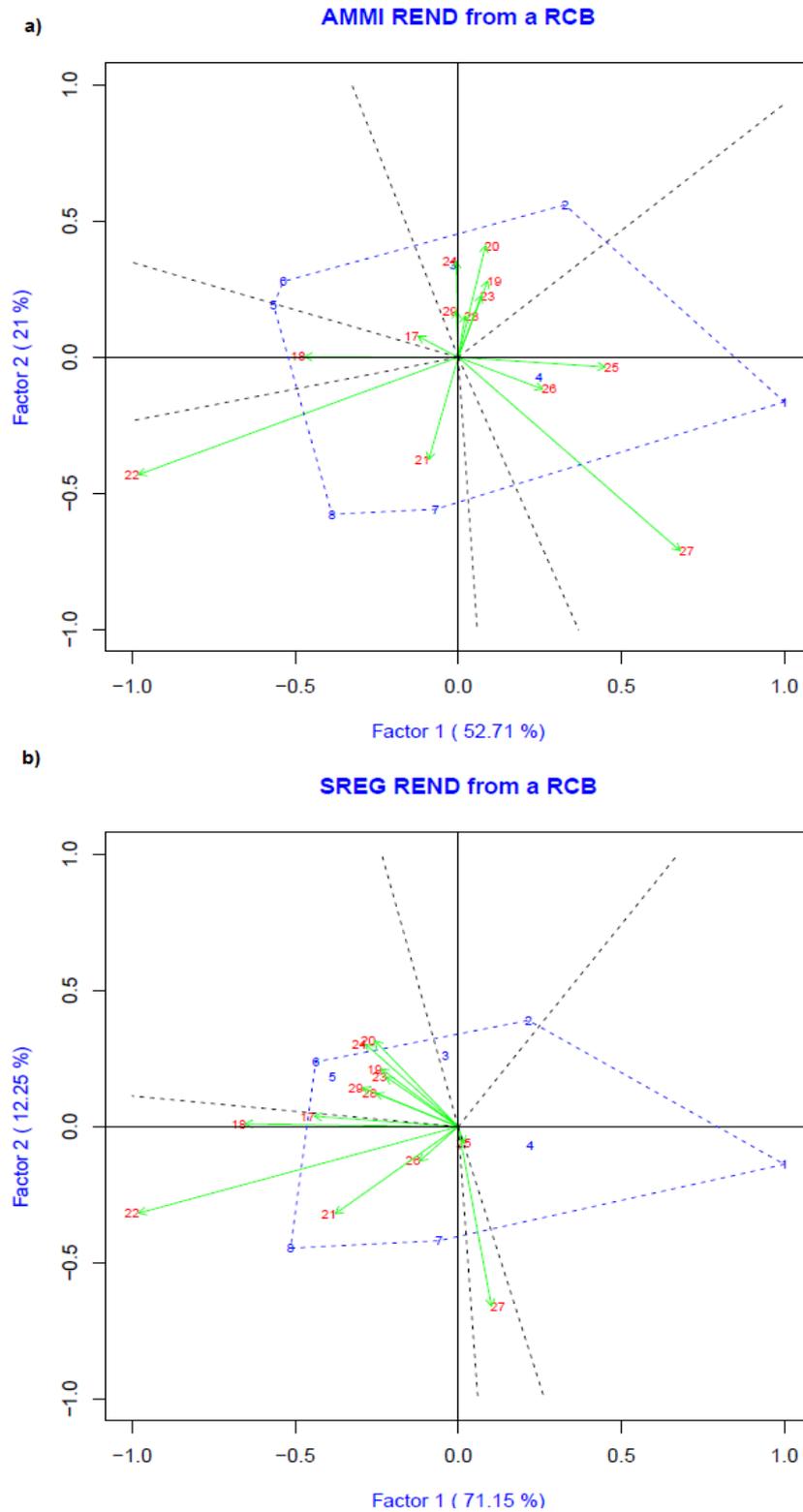


Figura 2.8. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región de El Bajío.

En el AMMI de la región Noroeste (Figura 2.9a), se visualizan tres mega-ambientes principalmente. En este biplot se observa una gran IGA, ya que algunos genotipos interactúan favorablemente con ciertos ambientes de una localidad; por ejemplo, Urbina S2007 interactúa positivamente con los ambientes de riego limitado de Cd. Obregón, pero negativamente con los ambientes de riego normal, donde sobresale 'Kronstad F2004'. Lo destacable de este biplot es el desempeño de 'Borlaug 100 F2014', 'Tacupeto' F2001 y 'Roelfs F2007', ya que se presumen como los más estables.

El SREG para el Noroeste permite ver de mejor manera el comportamiento de los genotipos; 'Urbina S2007' contrasta con el desempeño de los genotipos al estar en el lado opuesto del biplot; la línea experimental 'V13' y 'Borlaug 100 F2014' destacan como los genotipos con mejor comportamiento en los mega-ambientes de mayor cantidad de ambientes (Figura 2.9b).

En el AMMI de la región Norte presentado en la Figura 2.10a, se observa una clara variación en la interacción de los genotipos por los años de las localidades, muestra de ello es el desempeño de 'Tacupeto F2001', 'V12' y 'Roelfs F2007' que interactúan positivamente con los ambientes del segundo ciclo de Zaragoza y Río Bravo en ambos niveles de riego, pero desfavorablemente con los del primer ciclo; lo opuesto ocurre con los genotipos 'Kronstad F2004', 'Borlaug 100 F2014' y 'V13'. El análisis SREG mostrado en la Figura 2.10b permite una mejor interpretación del comportamiento de los genotipos. En el biplot es fácil observarse que 'Borlaug 100 F2014', 'V13' y 'Kronstad F2004' son los más sobresalientes en gran cantidad de ambientes, exceptuando delicias riego normal y Río Bravo riego reducido, ambas del ciclo 2012-2013.

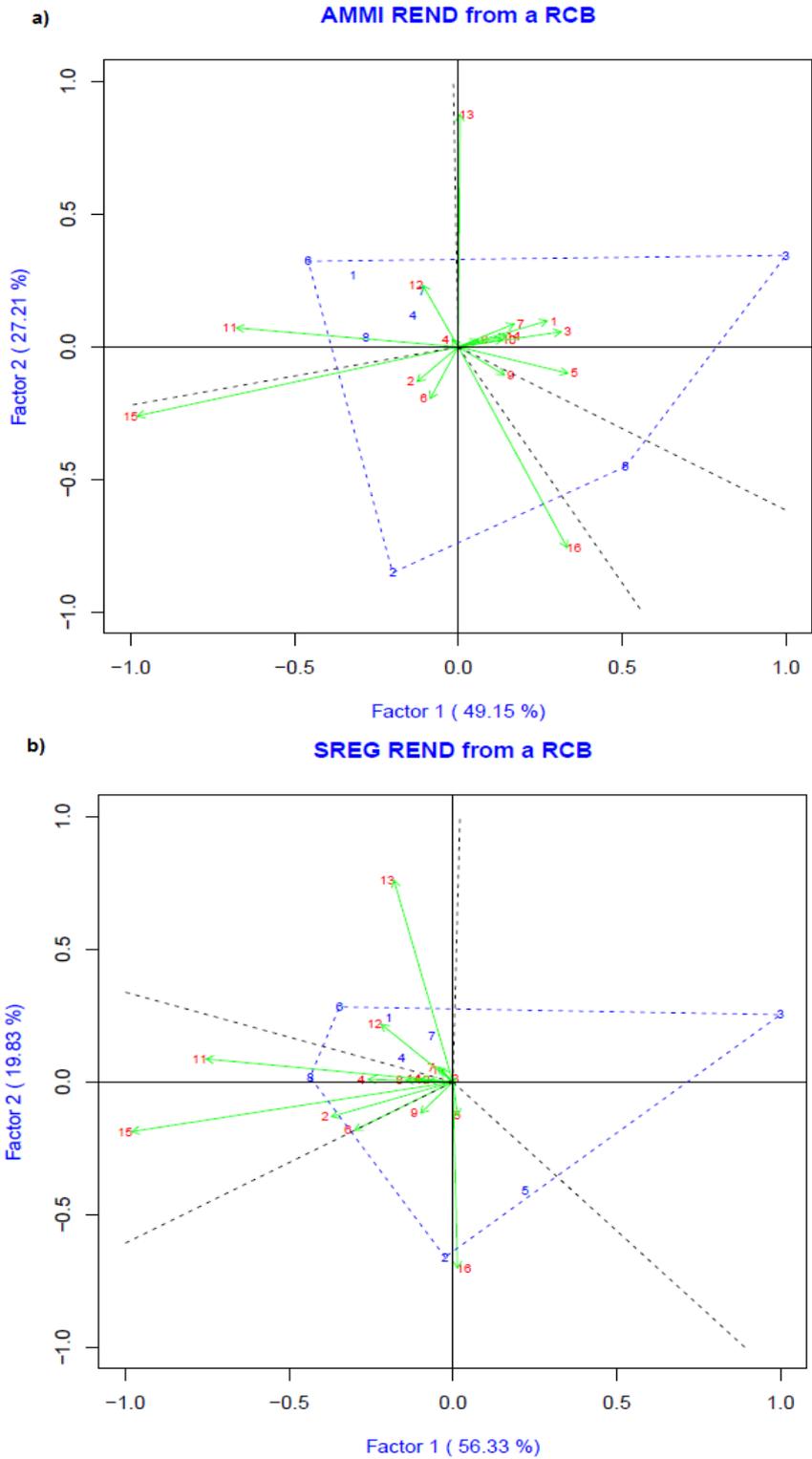


Figura 2.9. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), construidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región Noroeste.

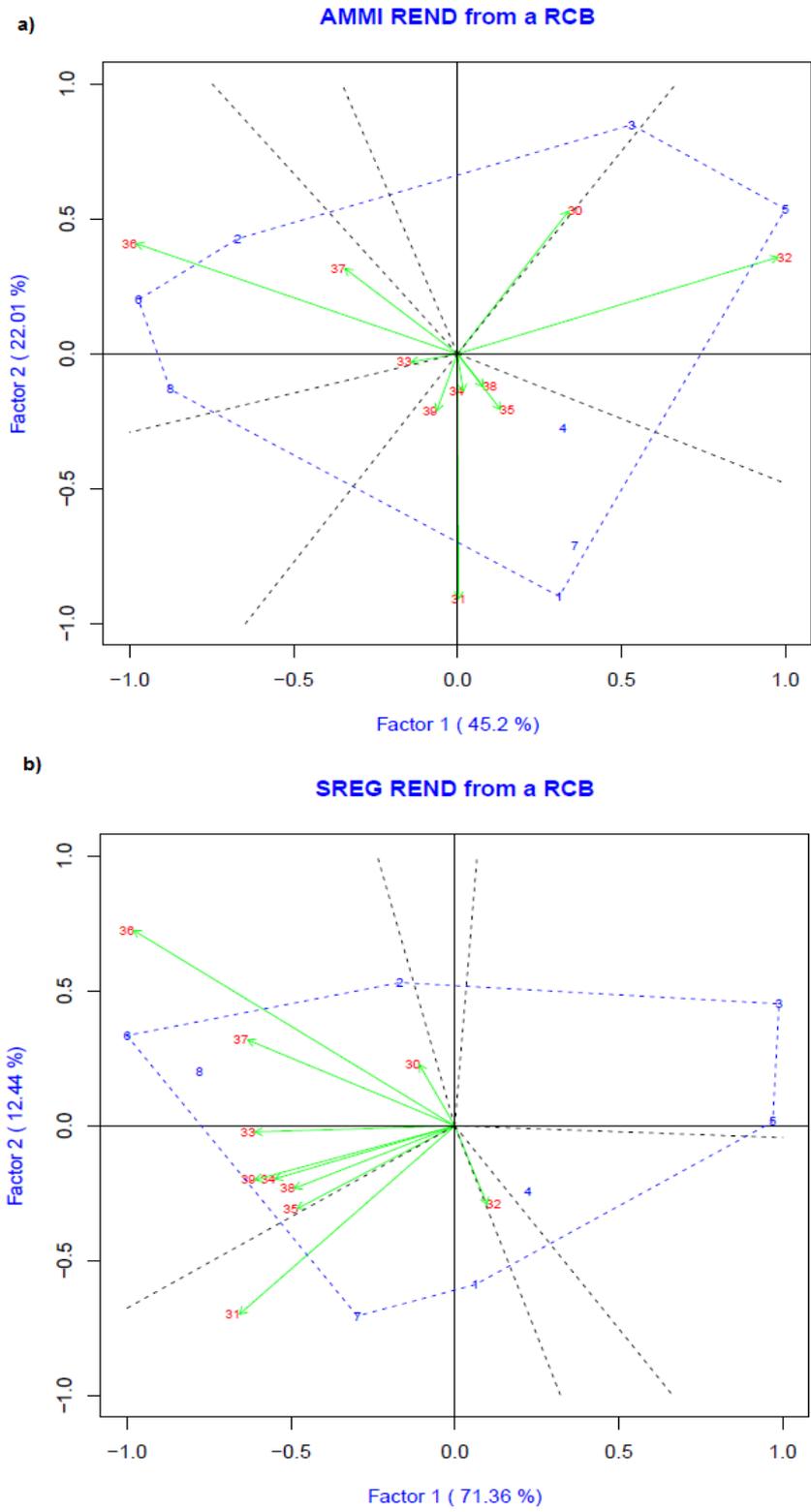


Figura 2.10. Representaciones gráficas de los análisis AMMI (a) y SREG (b), contruidos a partir de los dos primeros componentes principales para el rendimiento de trigos harineros en el análisis de los ambientes de la región Norte.

3.5. DISCUSIÓN

Los parámetros de estabilidad utilizados se complementan bastante bien con los análisis AMMI y SREG para realizar la interpretación de la IGA, en especial con el SREG; ya que coincidieron generalmente en la identificación de los genotipos más estables.

La variabilidad ambiental presente en los ENTRI resulta bastante útil para evaluar IGA, pero puede llegar a ser confusa en caso de no realizarse una estratificación regional para poder llegar a conclusiones más acertadas; sin embargo los análisis AMMI y SREG realizados tanto general como por nivel de riego nos permiten tener una diferente perspectiva del comportamiento de los genotipos, ya que en algunos casos se encontró una tendencia positiva por parte de los genotipos sobre ciertas regiones.

La evaluación en el mediano y a largo plazo los ENTRI es de vital importancia a fin de evaluar factores relacionados con el cambio climático, para muestra está el hecho de que aun estratificando por región, el comportamiento de los genotipos varía hasta dentro de localidades, ya que algunos de estos tienen mejor comportamiento en un año que en otro; e inclusive el efecto de los años sobre los genotipos en algunos casos llega a ser mayor que el efecto de fecha de siembra o nivel de riego.

En el caso específico de los genotipos, el análisis multiambiente permitió discernir entre aquellos que tenían una amplia adaptación o específica. Por ejemplo, la variedad 'Sáwali Oro C2008' de los trigos cristalinos en el Noroeste obtuvo una $bi=1.45$, indicando una tendencia positiva en los ambientes favorables. Este hecho se confirma con los AMMI y SREG para los agrupamientos de riego normal, reducido y del Noroeste, donde este genotipo interactúa positivamente con los ambientes de alto potencial productivo como los de Mexicali y Cd. Obregón. Otro caso es la variedad

'Gema C2004' que interactúa favorablemente con los ambientes de El Bajío; estas dos variedades fueron generadas específicamente para las regiones en las cuales interactúan positivamente (Moya *et al.*, 2005; López *et al.*, 2012). Los trigos harineros no mostraron tendencias tan marcadas en su afinidad para ciertas regiones como los trigos cristalinos.

A pesar de la gran diversidad ambiental previamente mencionada en los ENTRI, se evidencia la importancia de estos ensayos multiambiente, ya que se encontraron algunos genotipos con altos rendimientos y estables (genotipos fiables). Los genotipos que cumplieron estas características en gran parte de los agrupamientos son las líneas avanzadas de ambas especies, con excepción de 'V12' que sólo sobresalió en el Norte, junto con las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos y 'Borlaug 100 F2014' de los harineros; esto es corroborado con la clasificación de Márquez y Córdova (1976), donde se observa que los genotipos mencionados se encuentran en la clasificación 4, que hace referencia a rendimientos altos y estables pero impredecibles. Cabe destacar que estos mismos genotipos también fueron los que tuvieron menor coeficiente de variación (Tipo 1), lo que indica que la selección y evaluación en ensayos multiambiente permitió generar estos genotipos que mantienen su alto rendimiento hasta cierto punto constante a través de los cambios ambientales al haber sido sometido a una gran cantidad de estreses durante su proceso de generación (Braun y Payne, 2013); sin embargo, es necesario señalar que los coeficientes de variación obtenidos fueron de hasta 45.59 % en el caso de "V12" para riego reducido, muy por encima del valor deseable del 20 % que marca la literatura (Lin *et al.*, 1986).

Estos genotipos con rendimiento fiable se convierten en una gran alternativa para combatir el desabastecimiento de trigo debido al cambio climático, ya que mostraron

ser de los mejores y estables a pesar de las altas temperaturas que pueden presentarse en etapas de llenado de grano provocado por fechas tardías de siembra (Solís *et al.*, 2007; Félix *et al.*, 2009), o heladas como ocurrió en El Bajío en el ciclo 2012-2013 (Fuentes Pochat, 2013), además de mostrar un uso más eficiente del agua.

3.6. CONCLUSIONES

La variabilidad ambiental presente en los ENTRI resultó ser una herramienta útil en la evaluación de la IGA.

Los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell (1966), apoyada con la clasificación propuesta por Márquez y Córdova (1976), resultaron ser una buena herramienta para evaluar el comportamiento de los genotipos.

El coeficiente de variación identificó generalmente como estables a prácticamente los mismos genotipos que los parámetros de estabilidad antes mencionados; sin embargo, los altos valores obtenidos con esta estadística no son propios para hacer una recomendación.

El análisis AMMI permitió evaluar el comportamiento de los genotipos a través de los diferentes ambientes y ver el efecto de los diversos factores evaluados sobre el rendimiento, observándose un mayor efecto por parte de los años de evaluación.

El SREG ayudó a complementar y confirmar de manera gráfica los resultados obtenidos por los parámetros de estabilidad.

Los ENTRI mostraron ser de gran apoyo en la identificación de genotipos estables y de alto rendimiento en la mayoría de los agrupamientos, dichos genotipos fueron: 'V11', 'V15', 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos, y 'V12', 'V13' y 'Borlaug 100 F2014' en el caso de los trigos harineros. Debido a lo anteriormente

mencionado, estos genotipos son una gran alternativa para combatir el cambio climático, ya que exhibieron un alto rendimiento a pesar de los diferentes factores bióticos y abióticos a los cuales fueron sometidos en los 39 ambientes y tuvieron una respuesta proporcional a estos, mientras otros genotipos eran subsensibles o supersensible en su respuesta.

3.6. BIBLIOGRAFÍA

- Alejos, G., P. Monasterio, y R. Rea. 2006. Análisis de la interacción genotipo - ambiente para rendimiento de maíz en la región maicera del estado Yaracuy, Venezuela. *Agron. Trop.* 56(3): 369-384.
- Annicchiarico, P. 2002. *Genotype x Environment Interactions: Challenges and Opportunities for Plant Breeding and Cultivar Recommendations.* Food & Agriculture org., Roma.
- Becker, H.C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30(3): 835-840.
- Becker, H.C., y J. León. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breed.* 101(3): 1-23.
- Braun, H.-J., y T. Payne. 2013. Fitomejoramiento en mega-ambientes (MP Reynolds, AJD Pask, DM Mullan, y PN Chavez-Dulanto, Eds.). *Fitomejoramiento fisiológico I enfoques Interdiscip. para Mejor. la Adapt. del Cultiv.:* 6-17.
- Braun, H.-J., S. Rajaram, y M. Ginkel. 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92(1-2): 175-183.
- Crossa, J., H.G. Gauch, y R.W. Zobel. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials.
- Eberhart, S. A., y W.A. Russell. 1966. Stability Parameters for Comparing Varieties. *Crop Sci.* 6(1): 36.
- Félix Valencia, P., J. Grageda Grageda, J.G. Quintana Quiroz, G. Fuentes Dávila, y J.E. Ortiz Enríquez. 2009. Horas frío en relación al rendimiento de trigo. *Áreas de producción del estado de Sonora.* Cd. Obregón, Sonora, México.
- Finlay, K.W., y G.N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14(6): 742.
- Francis, T.R., y L.W. Kannenberg. 1978. Yield stability studies in short-season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 58(4).
- Fuentes Pochat, J.L. 2013. Reporte estadístico 2013. Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo.
- Gauch, H.G. 2006. Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46(4): 1488.
- Gauch, H. G., J. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs.* Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands.
- Lin, C.S., y M.R. Binns. 1988. A method of analyzing cultivar x location x year experiments: a new stability parameter. *Theor. Appl. Genet.* 76(3).
- Lin, C.S., M.R. Binns, y L.P. Lefkovich. 1986. Stability Analysis: Where Do We Stand? *Crop Sci.* 26(1): 894-900.
- López, P.F., G.F. Dávila, V.V. Herrera, G.C. Villalba, J.L.F. Fuentes, y J.A.M. Lugo. 2012. «Sáwali Oro C2008», Nueva Variedad de Trigo Cristalino para el Noroeste de México. *Rev. Mex. Fitopatol.* 30(1): 91-94.
- Márquez S., F., y H.S. Cordova. 1976. Efecto del número de líneas endogámicas sobre el comportamiento de sintéticos de maíz parámetros de estabilidad. II. Parámetros de estabilidad. *Inf. del maíz* 2: 15-23.
- Pacheco, A., M. Vargas, G. Alvarado, F. Rodríguez, M. López, J. Crossa, y J. Burgueño. 2015. *Genotype x Environment Analysis with R (GEA-R).*

- Perkins, J.M., y J.L. Jinks. 1968. Environmental and genotype-environmental components of variability. 3. Multiple lines and crosses. *Heredity (Edinb)*. 23(3): 339-356.
- Plaisted, R.L. 1960. A shorter method for evaluating the ability of selections to yield consistently over locations. *Am. Potato J.* 37(382): 166-172.
- Plaisted, R.L., y L.C. Peterson. 1959. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations or seasons. *Am. Potato J.* 36(11): 381-385.
- Rodríguez Pérez, J.E., J. Sahagún Castellanos, H.E. Villaseñor Mir, J.D. Molina Galán, Á. Martínez Garza, J.E.R. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(2): 143-151.
- Salas, E., H. Juaréz, D. Giraldo, W. Amorós, R. Simon, y M. Bornierbale. 2009. Modelos de análisis de estabilidad y definición de ambientes basados en GIS. Lima, Perú.
- Shukla, G.K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype environmental components of variability. *Heredity (Edinb)*.
- Solís Moya, E., P. Pérez Herrera, J. Huerta Espino, A. Ramírez Ramírez, H.E. Villaseñor Mir, y E. Espitia Rangel. 2005. Gema C2004, nueva variedad de trigo cristalino para la región el bajo, México. *Agric. Técnica en México* 31(2): 221-225.
- Solís Moya, E., S.A. Ríos Ruiz, H. García Nieto, A. Arevalo Valenzuela, O.A. Grageda Cabrera, M.A. Vuelvas Cisneros, J.G. Díaz de León Tobías, J.L. Aguilar Acuña, A. Ramirez Ramirez, J. Narro Sánchez, R. Bujanos Muñiz, A. Marín Jarillo, y R. Peña Martínez. 2007. Producción de trigo en El Bajío. 94pp.
- Tai, G.C.C. 1971. Genotypic Stability Analysis and Its Application to Potato Regional Trials. *Crop Sci.* 11(2): 184.
- Vargas, M., J. Crossa, F. a. Van Eeuwijk, M.E. Ramírez, y K. Sayre. 1999. Using partial least squares regression, factorial regression, and AMMI models for interpreting genotype x environment interaction. *Crop Sci.* 39(4): 955-967.
- Wricke, G. 1962. Über eine methode zur erfassung der ökologischen streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzüchtg* 47: 92-96.
- Yan, W., L. a. Hunt, Q. Sheng, y Z. Szlavncs. 2000. Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. *Crop Sci.* 40(3): 597.

IV. DISCUSIÓN GENERAL

La diversidad ambiental presente en los ENTRI tuvo un efecto en el comportamiento de los genotipos, hasta el punto de que dicho efecto fue observado entre los años para la misma localidad, tal como se muestra en las figuras correspondientes a los AMMI para diferentes regiones productoras. La información recabada a través de la experimentación en estos ensayos es muy valiosa, útil y original, ya que no existe información sobre la comparación entre los potenciales productivos de las regiones trigueras del país, donde el Noroeste fue la región de mayor potencial productivo, seguida por El Bajío y Norte. Además se observó heterogeneidad en el comportamiento de los genotipos de ambas especies, inclusive dentro de esas regiones, en especial en trigo harinero; en cambio en el caso de trigo cristalino se podría plantear la posibilidad de reducir el número de ambientes de evaluación para la región de El Bajío y el Norte, y utilizar a aquellos de mayor potencial de rendimiento (Braun *et al.* 1996).

En cuanto a la comparación entre especies, este trabajo permite dar un panorama de los avances genéticos en el potencial de rendimiento de ambas especies por región, esto debido a que los genotipos evaluados son variedades elite y líneas candidatas a la liberación, cumpliendo con lo mencionado por Marti y Slafer (2014), ya que la comparación fue justa, en donde el trigo cristalino presentó un rendimiento superior al del harinero con las excepciones de la región del Noroeste y El Bajío en riego limitado. El efecto de la eliminación de riego en etapas de llenado de grano y el de las fechas de siembra, tuvieron un efecto detrimental en ambas especies, siendo generalmente mayor en trigos cristalinos.

En lo que respecta a la evaluación de los genotipos, los ENTRI mostraron ser una invaluable herramienta en la identificación de líneas candidatas a evaluación mediante la comparación con las variedades actuales. Las líneas candidatas de ambas especies junto con las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos, y 'Borlaug 100 F2014' en el caso de los trigos harineros, mostraron tener un rendimiento superior a los demás genotipos en gran parte de los agrupamientos; además estos genotipos, con excepción de 'V12', mostraron estabilidad en su rendimiento, a pesar de la diversidad ambiental a la cual fueron sometidos como golpes de calor provocados por fechas de siembra tardía (Félix *et al.*, 2009; Solís *et al.*, 2007), heladas, y estrés hídrico en etapas críticas del ciclo como durante el llenado de grano, esta última evidencia un uso eficiente del agua.

V. CONCLUSIÓN GENERAL

Los ensayos nacionales de trigo de riego mostraron ser una importante herramienta en evaluación del comportamiento de los genotipos de trigo cristalino y harinero.

El empleo de ensayos uniformes localizados a lo largo del territorio mexicano, permitió comparar el potencial productivo de las regiones, donde el Noroeste figuró como la de mayor potencial, seguida por El Bajío y Norte.

La ausencia de interacción significativa para trigos cristalinos en la región de El Bajío y Norte, plantea la posibilidad de reducir los ambientes de evaluación a los más representativos; no así para los trigos harineros, ya que presentaron interacción en todos los agrupamientos, obligando la exploración del germoplasma en diferentes puntos geográficos.

Algo único de los ENTRI es la gran diversidad ambiental generada por las diversas condiciones propias de cada localidad, efecto de los años, niveles de riego y fechas de siembra; sin embargo a pesar de dicha diversidad, las líneas avanzadas candidatas a liberación exhibieron mayor rendimiento y estabilidad de este carácter comparados contra gran parte de las variedades que conforman los mosaicos genéticos de las regiones productoras, siendo iguales a las variedades 'Cirno C2008' y 'Anatoly C2011' de los trigos cristalinos, y 'Borlaug 100 F2014' en el caso de los trigos harineros.

Debido a lo anteriormente mencionado, es imprescindible continuar con los ENTRI a fin de generar genotipos elite y estables bajo una amplia gama de condiciones ambientales, tal y como se hizo en este trabajo, comparando las líneas promisorias candidatas a liberación con las variedades actuales de cada región.

VI. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Aquino Mercado, P.R., R.J. Peña Bautista, y I. Ortiz Monasterio. 2008. Mexico y el CIMMYT. Primera Ed. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Braun, H.-J., y T. Payne. 2013. Fitomejoramiento en mega-ambientes (MP Reynolds, AJD Pask, DM Mullan, y PN Chavez-Dulanto, Eds.). Fitomejoramiento fisiológico I: enfoques interdisciplinarios para mejorar la adaptacion del cultivo.: 6-17.
- Braun, H.-J., S. Rajaram, y M. Ginkel. 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92(1-2): 175-183.
- Félix Valencia, P., J. Grageda Grageda, J.G. Quintana Quiroz, G. Fuentes Dávila, y J.E. Ortiz Enríquez. 2009. Horas frio en relacion al rendimiento de trigo. Areas de producción del estado de Sonora. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Figueroa López., P., J.L. Félix Fuentes, G. Fuentes Dávila, V. Valenzuela Herrera, G. Chávez Villalba, y J.A. Mendoza Lugo. 2010. Cirno C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de sonora. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* 1(5): 745-749.
- Fuentes Dávila, G., P. Figueroa López., M.A. Camacho Casas, J.L. Félix Fuentes, y G. Chávez Villalba. 2014. ' Quetchehueca oro c2013 ', a new durum wheat cultivar for northwest México. *Rev. Fitotec. Mex.* 37(4): 399-401.
- Fuentes Pochat, J.L. 2013. Reporte estadístico 2013. Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo.
- Huerta Espino, J., H.E. Villaseñor Mir, E. Espitia Rangel, E. Solís Moya., y M. Van Ginkel. 2011. The history of wheat breeding in Mexico. p. 277-308. *En* Bonjean, A.P., Angus, W.J., Van Ginkel, M. (eds.), *The World Wheat Book*.
- Marti, J., y G.A. Slafer. 2014. Bread and durum wheat yields under a wide range of environmental conditions. *F. Crop. Res.* 156: 258-271.
- Solís Moya, E., S.A. Ríos Ruiz, H. García Nieto, A. Arevalo Valenzuela, O.A. Grageda Cabrera, M.A. Vuelvas Cisneros, J.G. Díaz de León Tobías, J.L. Aguilar Acuña, A. Ramirez Ramirez, J. Narro Sánchez, R. Bujanos Muñoz, A. Marín Jarillo, y R. Peña Martínez. 2007. Producción de trigo en El Bajío. : 94.
- Villaseñor Mir, H.E., A. Limón Ortega, M.F. Rodríguez García, E. Martínez Cruz, R. Hortelano Santa Rosa, y L.A. Mariscal Amaro. 2011. Evaluación bajo condiciones de temporal de variedades de trigo macarronero generadas para riego. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* 2(5): 759-764.

VII. ANEXO

Cuadro 7.1. Descripción de los sitios experimentales ubicando el ciclo de cultivo, la región y nivel de riego.

Región	Ciclo agrícola	Nombre completo de localidad Incluyendo condición de riego	Abreviatura sitio
Norte	2012-13	Delicias, Chih. Riego Reducido	DELICIASRL-13
Norte	2012-13	Delicias, Chih. Riego Normal	DELICIASRN-13
Bajío	2012-13	La Barca, Jal. Riego Reducido	LBRCARL-13
Bajío	2012-13	La Barca, Jal. Riego Normal	LBRCARN-13
Noroeste	2012-13	Los Mochis, Sin. Riego Reducido	LMOCHRL-13
Noroeste	2012-13	Los Mochis. Riego Normal	LMOCHRN-13
Noroeste	2012-13	Mexicali, B.C.N. Riego Reducido	MEXLIRL-13
Noroeste	2012-13	Mexicali, B.C.N. Riego Normal	MEXLIRN-13
Noroeste	2012-13	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Reducido	OBR1FRL-13
Noroeste	2012-13	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Normal	OBR1FRN-13
Noroeste	2012-13	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Reducido	OBR2FRL-13
Noroeste	2012-13	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Normal	OBR2FRN-13
Norte	2012-13	Río Bravo, Tmp. Riego Reducido	RBRAVRL-13
Norte	2012-13	Río Bravo, Tmp. Riego Normal	RBRAVRN-13
Bajío	2012-13	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Reducido	ROQ1FRL-13
Bajío	2012-13	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Normal	ROQ1FRN-13
Bajío	2012-13	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Reducido	ROQ2FRL-13
Bajío	2012-13	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Normal	ROQ2FRN-13
Norte	2012-13	Zaragoza, Coah. Riego Reducido	ZRGZARL-13
Norte	2012-13	Zaragoza, Coah. Riego Normal	ZRGZARN-13
Bajío	2013-14	La Barca, Jal. Riego Normal	LBRCARN-14
Bajío	2013-14	Los Mochis, Sin. Riego Reducido	LMOCHRL-14
Noroeste	2013-14	Los Mochis. Riego Normal	LMOCHRN-14
Noroeste	2013-14	Mexicali, B.C.N. Riego Reducido	MEXLIRL-14
Noroeste	2013-14	Mexicali, B.C.N. Riego Normal	MEXLIRN-14
Bajío	2013-14	Yanhuitlán, Oax. Riego Reducido	OAXRL-14
Bajío	2013-14	Yanhuitlán, Oax. Riego Normal	OAXRN-14
Noroeste	2013-14	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Reducido	OBR1FRL-14
Noroeste	2013-14	Cd. Obregón, Son. 1ra Fecha Riego Normal	OBR1FRN-14
Noroeste	2013-14	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Reducido	OBR2FRL-14
Noroeste	2013-14	Cd. Obregón, Son. 2da Fecha Riego Normal	OBR2FRN-14
Norte	2013-14	Río Bravo, Tmp. Riego Reducido	RBRAVRL-14
Norte	2013-14	Río Bravo, Tmp. Riego Normal	RBRAVRN-14
Bajío	2013-14	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Reducido	ROQ1FRL-14
Bajío	2013-14	Roque, Gto. 1ra Fecha Riego Normal	ROQ1FRN-14
Bajío	2013-14	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Reducido	ROQ2FRL-14
Bajío	2013-14	Roque, Gto. 2da Fecha Riego Normal	ROQ2FRN-14
Norte	2013-14	Zaragoza, Coah. Riego Reducido	ZRGZARL-14
Norte	2013-14	Zaragoza, Coah. Riego Normal	ZRGZARN-14

Cuadro 7.2. Comparación del rendimiento de los ambientes en cada agrupamiento.

Ambientes	Todos los ambientes	Riego Normal	Riego Reducido	Noroeste	Norte/Noreste	Bajo/sur
DELICIASRL-13	1612	NA	1612	NA	1612	NA
DELICIASRN-13	5477	5477	NA	NA	5477(A)	NA
LBRCARL-13	1527	NA	1527	NA	NA	1527
LBRCARN-13	2517	2517	NA	NA	NA	2517
LMOCHRL-13	5821	NA	5821	5821	NA	NA
LMOCHRN-13	6097	6097	NA	6097	NA	NA
MEXLIRL-13	7254	NA	7254(A)	7254	NA	NA
MEXLIRN-13	8302 (A)	8302(A)	NA	8302 (A)	NA	NA
OBR1FRL-13	5585	NA	5585	5585	NA	NA
OBR1FRN-13	7957(A)	7957(A)	NA	7957(A)	NA	NA
OBR2FRL-13	4677	NA	4677	4677	NA	NA
OBR2FRN-13	6696	6696	NA	6696	NA	NA
RBRAVRL-13	1590	NA	1590	NA	1590	NA
RBRAVRN-13	3278	3278	NA	NA	3278	NA
ROQ1FRL-13	2639	NA	263	NA	NA	2639
ROQ1FRN-13	3951	3951	NA	NA	NA	3951
ROQ2FRL-13	2123	NA	2123	NA	NA	2123
ROQ2FRN-13	3647	3647	NA	NA	NA	3647
ZRGZARL-13	2992	NA	2992	NA	2992	NA
ZRGZARN-13	3586	3586	NA	NA	3586	NA
LBRCARN-14	5783	5783	NA	NA	NA	5783(A)
LMOCHRL-14	5451	NA	5451	5451	NA	NA
LMOCHRN-14	6125	6125	NA	6125	NA	NA
MEXLIRL-14	7403	NA	7403(A)	7403	NA	NA
MEXLIRN-14	7744(A)	7744(A)	NA	7744(A)	NA	NA
OAXRL-14	5401	NA	5401	NA	NA	5401
OAXRN-14	6127	6127	NA	NA	NA	6127(A)
OBR1FRL-14	4590	NA	4590	4590	NA	NA
OBR1FRN-14	5197	5197	NA	5197	NA	NA
OBR2FRL-14	4528	NA	4528	4528	NA	NA
OBR2FRN-14	5058	5058	NA	5058	NA	NA
RBRAVRL-14	3258	NA	3258	NA	3258	NA
RBRAVRN-14	3520	3520	NA	NA	3520	NA
ROQ1FRL-14	4817	NA	4817	NA	NA	4817
ROQ1FRN-14	5943	5943	NA	NA	NA	5943(A)
ROQ2FRL-14	3938	NA	3938	NA	NA	3938
ROQ2FRN-14	4576	4576	NA	NA	NA	4576
ZRGZARL-14	4708	NA	4708	NA	4708	NA
ZRGZARN-14	4429	4429	NA	NA	4429	NA
DSH (.05)	745.6	730.5	636.5	666.8	679.1	571.8

Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey (0.05).

Cuadro 7.3. Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Cd. Obregón, Los Mochis y Mexicali.

Localidad	Ambiente	Rendimiento
Cd. Obregón	OBR1FRL-13	5.58
	OBR1FRN-13	7.95A
	OBR2FRL-13	4.67
	OBR2FRN-13	6.69
	OBR1FRL-14	4.59
	OBR1FRN-14	5.19
	OBR2FRL-14	4.52
	OBR2FRN-14	5.05
DSH (.05)		0.447
Los Mochis	LMOCHRL-13	5.82A
	LMOCHRN-13	6.09A
	LMOCHRL-14	5.45
	LMOCHRN-14	6.12A
DSH (.05)		0.43
Mexicali	MEXLIRL-13	7.40
	MEXLIRN-13	8.3A
	MEXLIRL-14	7.25
	MEXLIRN-14	7.74A
DSH (.05)		0.77

Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey (0.05).

Cuadro 7.4 Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Delicias, Río Bravo y Zaragoza.

Localidad	Ambiente	Rendimiento
Delicias	DELICIASRL-13	1.61
	DELICIASRN-13	5.47A
DSH (.05)		0.52
Río Bravo	RBRAVRL-13	3.25A
	RBRAVRN-13	3.27A
	RBRAVRL-14	1.59
	RBRAVRN-14	3.52A
DSH (.05)		0.449
Zaragoza	ZRGZARL-13	2.99
	ZRGZARN-13	3.58
	ZRGZARL-14	4.70A
	ZRGZARN-14	4.42A
DSH (.05)		0.57

Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey (0.05).

Cuadro 7.5. Comparación del rendimiento de los ambientes evaluados en Roque, La Barca y Yanhuitlán.

Localidad	Ambiente	Rendimiento
Roque	ROQ1FRL-13	2.63
	ROQ1FRN-13	3.95
	ROQ2FRL-13	2.12
	ROQ2FRN-13	3.64
	ROQ1FRL-14	4.81
	ROQ1FRN-14	5.94A
	ROQ2FRL-14	3.93
	ROQ2FRN-14	4.57
DSH (.05)		0.54
La Barca	LBRCARL-13	1.52
	LBRCARN-13	2.51
	LBRCARN-14	5.78A
DSH (.05)		0.38
Yanhuitlán	OAXRL-14	5.40
	OAXRN-14	6.12A
DSH (.05)		0.33

Diferencia significativa honesta (DHS). Tukey (0.05).