

Rendimiento y calidad de fruto en tomate, diferencias genotípicas y estabilidad en tres ambientes agronómicos

Tomato yield and fruit quality, genotypical differences and stability in three agronomical environments

Fernando Borrego-Escalante^{1*}, Verónica G. Robles-Salazar¹,
María Margarita Murillo-Soto¹, Alfonso López-Benítez¹, Adalberto Benavides-Mendoza²

¹Departamento de Fitomejoramiento, ²Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.
Tel. Fax 52 844 411 0200 (ext. 2600). Correo electrónico: fborregoe9@gmail.com (* Autor responsable)

RESUMEN

Para la formación de nuevas variedades de tomate se requiere evaluar los materiales genéticos en diferentes ambientes y medir su interacción genotipo-ambiente (IGA), para luego seleccionar los de menor interacción, los más estables. Modelos como el de regresión en los sitios (SREG) y el de efectos principales aditivos e interacción multiplicativo (AMMI) se utilizan para el estudio de los patrones de respuesta genotípica a través de ambientes. El objetivo de este proyecto fue determinar, por medio de dos metodologías, los materiales genéticos más prominentes en cuanto a características de rendimiento, contenido nutrimental y estabilidad por su interacción genotipo-ambiente (IGA). El trabajo de investigación se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el que se evaluaron 21 genotipos de tomates establecidos en tres ambientes agronómicos (campo abierto, macrotúnel e invernadero). El diseño experimental que se utilizó fue el de bloques completos al azar, con tres repeticiones. De acuerdo con los datos del análisis de varianza combinado, se obtuvieron diferencias ($P \leq 0.01$) en la IGA para rendimiento. El genotipo 23 se puede considerar como ideal, por su adaptabilidad en los tres ambientes. En relación con las variables: contenido de licopeno y vitamina C, destacaron los genotipos 12 y 17, respectivamente. Los genotipos más estables fueron: 5, 18, 26, 2 y 22. Ambos modelos coincidieron con estos resultados. Tanto el modelo AMMI 1 como el SREG son igual de capaces para describir la interacción genotipo-ambiente, sin embargo, el AMMI 1 resulta ser más fácilmente interpretable.

Palabras clave: rendimiento, calidad, *Solanum lycopersicum* L., AMMI, SREG.

ABSTRACT

For the formation of new tomato varieties, it is necessary to evaluate the genetic materials in different environments and measure their genotype-environment interaction (GAI). Models such as site regression (SREG) and additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) are used for the study of genotypic response patterns across environments. The objective of the project was to determine the most prominent genetic materials, in terms of performance characteristics, nutritional content and stability, with two methodologies. Also to defining which model best describes the GAI. The research work was carried at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; 21 genotypes of tomatoes established in three environments (open field, macro tunnel and greenhouse) were evaluated. The experimental design used was a randomized complete block design, with three repetitions. According to the data obtained in the combined analysis of variance, differences were obtained ($P \leq 0.01$) for the GAI for performance. The genotype 23 can be considered as ideal, due to its adaptability in the three environments. For the lycopene and vitamin C content variables, genotypes 12 and 17 stood out, respectively. The most stable genotypes were: 5, 18, 26, 2 and 22. Both models coincided with these results. Both the AMMI 1 and SREG models are equally capable of describing the genotype-environment interaction, however AMMI 1 is more easily interpretable.

Keywords: yield, quality, *Solanum lycopersicum* L., AMMI, SREG.

INTRODUCCIÓN

El consumo regular de vegetales, incluyendo el tomate, está asociado con numerosos beneficios a la salud, como la prevención de enfermedades de tipo crónico-degenerativas y cardiovasculares. Los responsables de estas propiedades en los frutos son los compuestos antioxidantes que comprenden al licopeno, flavonoides, fenoles y vitaminas como C y E. Es propósito del fitomejoramiento obtener mejores variedades, de mayor rendimiento, de mejor contenido nutrimental y estables. El contenido y estabilidad de estos compuestos depende del cultivar o de la variedad utilizada, condiciones ambientales de cultivo, estado de maduración del fruto y tratamientos poscosecha (Luna y Delgado, 2014).

Los principales países productores de tomate en el mundo son: China, Estados Unidos, Turquía, Italia e India; México ocupa el noveno lugar. Las cinco entidades federativas más productoras de tomate en nuestro país son: Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Zacatecas; de estas, Sinaloa es el principal productor con 684,333 t, lo que representa 20.3% de la producción nacional. En el área de influencia inmediata de la UAAAN, en los estados de Coahuila y Durango, en el 2020 se reportó el cultivo de 1,060 ha de tomate, con un rendimiento promedio de 134.65 t ha⁻¹ (campo, casa sombra e invernaderos), es decir, 150,839 t, y un valor de la producción de 989 millones de pesos; en la región sureste de Coahuila se producen al año 5,217 t (SIAP, 2020).

Para el desarrollo de un programa de mejoramiento genético del tomate en México y favorecer la formación de nuevas variedades, es necesario evaluar los materiales genéticos en diferentes ambientes y medir su interacción genotipo-ambiente, para así tener una idea de la estabilidad fenotípica de los genotipos ante las fluctuaciones ambientales (Sánchez Aspeytia *et al.*, 2015).

Lozano *et al.* (2015) mencionan que, para obtener un genotipo más cercano a lo ideal, se pueden utilizar varios modelos para estudiar e interpretar la interacción $G \times A$ en experimentos agrícolas. Los modelos de efectos fijos lineal-bilineal, como el SREG (Crossa y Cornelius, 1997) y el de efectos principales aditivos e interacción multiplicativo (AMMI) (Gauch, 1988; Gauch y Zobel, 1997), se utilizan para el estudio de los patrones de respuesta genotípica a través de ambientes.

Sánchez Aspeytia *et al.* (2015) estimaron la interacción genotipo-ambiente y estabilidad de caracte-

rísticas de rendimiento, fisiológicas y de calidad de 25 genotipos de tomate en tres ambientes a través del modelo AMMI. El resultado del análisis indicó que sólo un genotipo fue el mejor en cuanto a las variables de calidad y rendimiento, y los ambientes de evaluación mostraron ser muy diferentes en su discriminación de los materiales genéticos.

Suwarto (2011) menciona que el análisis del método GGE-biplot es útil para determinar el rendimiento relativo de un genotipo en un entorno específico y comparar el rendimiento de genotipos en diferentes entornos. Gauch (2006) compara los métodos AMMI y SREG, y sostiene que el método AMMI es superior, porque un biplot AMMI1 tiene una geometría más simple e informativa que un biplot GGE2 y el biplot AMMI2, que no tiene equivalente GGE, puede capturar sustancialmente más variación. Sin embargo, también menciona que, para el propósito de obtener precisión, AMMI y GGE son igualmente capaces.

Los objetivos de la presente investigación fueron: determinar los materiales genéticos más prominentes a través de los ambientes de evaluación en cuanto a características de rendimiento y contenido nutrimental; identificar genotipos que presenten estabilidad y adaptabilidad en rendimiento, y definir qué modelo describe mejor la interacción genotipo-ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se utilizaron nueve genotipos como progenitores, los cuales se han obtenido a través de evaluaciones en campo e invernadero, cruzamientos y derivación de líneas sobresalientes en el área académica de Fisiotecnia, del Departamento de Fitomejoramiento de la UAAAN; además, se evaluaron ocho híbridos experimentales y cuatro testigos comerciales (Cuadro 1).

Los 21 genotipos se estudiaron en tres ambientes agronómicos: campo abierto, macrotúnel e invernadero. Estos ambientes agronómicos se encuentran dentro de la UAAAN. Los materiales genéticos se sembraron en charolas de 200 cavidades. Las charolas se apilaron unas sobre otras y se envolvieron con plástico negro para estimular la germinación, y tres días después se trasladaron a una malla sombra, donde se mantuvieron hasta que presentaron sus primeras hojas verdaderas y el desarrollo radicular alcanzó el desarrollo adecuado para su trasplante. En los tres

Cuadro 1. Material genético utilizado, establecido en tres ambientes agronómicos: campo abierto, túnel e invernadero.

Genotipo	Genealogía	Hábito de crecimiento	Tipo	Descripción
1	F3	Indeterminado	Bola	Progenitor
2	R1	Determinado	Bola	Progenitor
3	Y4xR1	Indeterminado	Saladette	Progenitor
4	Y533	Determinado	Saladette	Progenitor
5	S1xL1	Indeterminado	Bola	Progenitor
12	Rio grande	Determinado	Saladette	Híbrido comercial
13	Floradade	Determinado	Bola	Híbrido comercial
14	Montecarlo	Indeterminado	Bola	Híbrido comercial
15	El Cid	Indeterminado	Saladette	Híbrido comercial
16	Y41	Indeterminado	Bola	Progenitor
17	K3	Indeterminado	Bola	Progenitor
18	L1	Indeterminado	Bola	Progenitor
22	{45x47} x R1	Indeterminado	Bola	Híbrido experimental
23	Y41 x {Y4xR1}	Indeterminado	Saladette	Híbrido experimental
24	F3 x {45x47}	Indeterminado	Bola	Híbrido experimental
25	45x47	Indeterminado	Bola	Progenitor
26	F3 x {Y4xR1}	Indeterminado	Saladette	Híbrido experimental
27	K3 x Y41	Indeterminado	Bola	Híbrido experimental
28	F3 x Y533	Indeterminado	Saladette	Híbrido experimental
29	L1 x {S1xL1}	Indeterminado	Bola	Híbrido experimental
30	K3 x Y533	Indeterminado	Bola	Híbrido experimental

ambientes, cada parcela se identificó con un número que correspondía a un genotipo y repetición.

Los tutores se colocaron 20 días después del trasplante, y también se les realizaron podas. Estas fueron a un tallo para los tomates de hábito indeterminado, y dos tallos para los de hábito determinado. Este criterio se aplicó en los tres ambientes.

La fertilización para los ambientes campo abierto y macrotúnel fue: 450-450-225-100(NO₃)₂Ca; la aplicación del nitrógeno se realizó en dos partes: la primera, dos días antes del trasplante, la segunda, 30 días después del trasplante. Los fertilizantes utilizados fueron

los siguientes: sulfato de amonio (20.5-00-00), multi NPK (13-02-44), sulfato de potasio (00-00-50), nitrato de calcio (15.5-00-00- 19.9 Ca). Los riegos para los tres ambientes se llevaron a cabo dos veces por semana o de acuerdo con los requerimientos del cultivo, y en invernadero, por tratarse de fertirriego –de acuerdo con análisis de agua de riego (bicarbonatos)–, se aplicaron las proporciones en dos etapas de crecimiento (Cuadro 2).

La cosecha se realizó de manera manual. Se seleccionó una planta con competencia completa para los tres ambientes. Los frutos se colocaron en bolsas

Cuadro 2. Porciones de nutrientes utilizadas en 1 000 L de agua, en el ambiente agronómico de invernadero.

0 a 75 DDT				75 DDT al final de cosecha	
Nitrato de calcio	36 g*	Poliquel fierro	60 mL*	Nitrato de potasio	544 g
Nitrato de potasio	443 g	Poliquel multi	30 mL*	Ácido fosfórico	65 mL
Ácido fosfórico	57 mL			Ácido nítrico	314 mL
Ácido nítrico	205 mL				

*Se aplicó la misma cantidad durante todo el ciclo de cultivo; DDT= días después del trasplante.

de papel previamente identificadas con un número correspondiente al genotipo, repetición y ambiente a donde pertenece, para después llevarse al laboratorio de Fisiotecnia.

Toma de datos. Para obtener el rendimiento total en tha^{-1} de cada genotipo, se multiplicó el peso total de frutos cosechados por planta, por la densidad de población. Se manejó una densidad de 31,250 plantas por hectárea para campo abierto; 38,461 plantas por hectárea para túnel, y 37,537 plantas por hectárea para invernadero (de acuerdo con la distancia entre bordos y distancia entre plantas).

Pruebas de contenido nutrimental. Se eligieron tres frutos de cada genotipo y se registró cada uno (genotipo, repetición y número de ambiente), para posteriormente picarlos y molerlos en su vaso de precipitado correspondiente.

Con un refractómetro portátil (ATAGO 01018) se determinaron los grados Brix para cada uno de los materiales genéticos, y con un potenciómetro (CONDUCTRONIC Modelo 10), el pH.

Para determinar la vitamina C, de los frutos ya molidos contenidos en los vasos de precipitado, se tomó una muestra de 20 gramos de cada tratamiento, para luego agregarles 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 2%; posteriormente se colocaron los vasos en un agitador vortex durante 20 minutos. Una vez agitada la muestra, se filtró el contenido en matraces Erlenmeyer y se les agregó 100 mL de agua destilada. Del contenido de los matraces se tomaron 10 mL y se procedió a titular con reactivo de Thielmann, hasta obtener una coloración rosa permanente, para luego anotar los mililitros consumidos del reactivo y determinar el contenido de vitamina C en cada genotipo.

La ecuación utilizada para la determinación de vitamina C fue la siguiente, de acuerdo con Chechekin *et al.* (1984):

$$\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ de vitamina C} = \frac{a \times 0.088 \times VT \times 100}{VA \times P}$$

Donde:

- a = mL gastados de reactivo de Thielmann;
- 0.088 = mg de ácido ascórbico equivalente a 1 mL de reactivo de Thielmann;
- VT = Volumen total en mL del filtrado de vitamina C en HCl;
- VA = Volumen en mL de la alícuota valorada;
- P = Peso de la muestra (20g).

Contenido de licopeno. Se extrajo 1 g de muestra que se colocó en un tubo de ensayo. Se agregó 1 mL de buffer fosfato y se agitó. Se eliminó el excedente de muestra (3 mL) y se colocó en tubo de ensayo, al que se le agregaron 6 mL de hexano-acetona (3:2) para luego agitarlo. Se centrifugó durante cinco minutos, a 5 000 revoluciones por minuto (rpm). Se tomó 1 mL de la muestra y se colocó en las celdillas, a las que se les agregaron 2 mL de acetona, y en un espectrofotómetro (Spectronic 21) se les tomó lectura a 502 nm de absorbancia.

Diseño experimental. El diseño experimental que se utilizó fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones, en los tres ambientes. El análisis estadístico se efectuó como un análisis combinado con los tres ambientes, y se hizo mediante el modelo, Steel y Torrie (1980):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha_j * \beta_j) + \partial_{k(j)} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} = Observación del i-ésimo tratamiento en su k-ésima repetición en el j-ésimo ambiente;
 μ = Efecto de la media general;
 α_i = Efecto del tratamiento;
 β_j = Efecto del j-ésimo ambiente;
 $\alpha_i * \beta_j$ = Efecto de la interacción entre el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo ambiente;
 $\partial_{k(j)}$ = Efecto de la k-ésima repetición anidada en el j-ésimo ambiente;
 ε_{ijk} = Efecto del error experimental.

Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI). El análisis multivariado AMMI se analizó con el siguiente modelo (Zobel, 1988):

$$Y_{ij} = \mu + g_i + a_j + \lambda_k + \alpha_{jk} + \gamma_{jk} + R_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} = Valor observado del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente;
 μ = Efecto de la media general;
 g_i = Media del i-ésimo genotipo menos la media general;
 a_j = Media del j-ésimo ambiente menos la media general;
 λ_k = Raíz cuadrada del valor característico del k-ésimo eje del análisis de componentes principales (ACP);
 $\alpha_{ik} \gamma_{jk}$ = Calificaciones del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente;
 R_{ij} = Residual del modelo.

El modelo de sitios de regresión SREG (GGA bi-plot). Según Cornelius *et al.* (1996) y Gauch y Zobel (1997) es:

$$Y_{ij} = \mu + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{jk} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} = rendimiento del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente;
 μ = media general;
 e_j = efecto del sitio;
 λ_k = valor propio del eje k de componentes principales;

α_{jk} = los vectores propios unitarios ambientales asociados a k;

γ_{jk} = vectores propios unitarios genotípicos asociados a k, y

R_{ij} = error del genotipo i en el ambiente j.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis de varianza combinado (Cuadro 3) se obtuvieron diferencias ($P \leq 0.01$) para ambientes, genotipos e interacción genotipo-ambiente para las variables rendimiento, pH y vitamina C. En la variable grados Brix se encontraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre genotipos y la interacción genotipo-ambiente, y no se encontró significancia para la fuente de variación ambiente. Para la variable licopeno se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) para ambientes y ($P \leq 0.01$) para genotipos e interacción genotipo-ambiente. Lo anterior indica la gran variabilidad entre los genotipos evaluados, ya que se incluían tomates de hábito indeterminado y determinado, así como tomates tipo bola y saladette.

En cuanto a las fuentes de variación genotipos y ambientes, se determinaron las diferencias mediante la prueba de medias de Tukey.

Para las variables de contenido nutrimental (cuadros 4 y 5), los genotipos se comportaron de manera similar en el macrotúnel e invernadero, viéndose menos favorecidos en el campo abierto, al igual que en la variable rendimiento.

Los genotipos que obtuvieron un mayor rendimiento fueron: 23 (124.99 t ha⁻¹), 24 (101.81 t ha⁻¹) y el 4 (97.94 t ha⁻¹). Krishnamurthy *et al.* (2015) mencionan que el uso de medias fenotípicas está muy extendido en los estudios de estabilidad y adaptabilidad en diferentes cultivos, pero no debe considerarse como un procedimiento óptimo para predecir los valores genotípicos, debido a la fuerte influencia del “ruido” o las interferencias (bloque, parcela, ubicación, año, etc.) que se confunden en los medios, enmascarando los valores genotípicos reales.

Respecto a la significancia que se obtuvo en la interacción genotipo-ambiente, se hace difícil para los fitomejoradores recomendar genotipos superiores. Ferraudo y Percin (2014) sugieren utilizar la prueba de Gollob (Cuadro 6) para saber a qué modelo AMMI recurrir. Los dos primeros componentes explican 100% de la variabilidad debida a la IGA, pero sólo en el componente principal (CP) 1 se en-

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado (cuadrados medios) para cuatro variables de rendimiento en 22 genotipos de tomate.

FV	GL	RDTO (t ha ⁻¹)	pH	°Bx (%)	VitC (mg/100g)	Licop (mg/100 g)
Amb	2	106.22 **	2.89 **	0.06	116.89**	0.03*
Rep(Amb)	6	4.12 *	0.03	0.06	7.34	0.01
Gen	20	7.01 **	0.25 **	0.40**	54.37**	0.07**
Amb*Gen	40	3.50 **	0.22 **	0.27**	19.21**	0.02**
Error	120	1.98	0.07	0.09	7.18	0.01
CV (%)		15.66	6.24	7.16	19.07	5.83
Media		82.95	4.47	4.40	14.05	0.73

*Nivel de probabilidad de 0.05, **Nivel de probabilidad de 0.01, FV= fuente de variación, GL= grados de libertad, RDTO= rendimiento, pH= potencial iones hidrógeno, °Bx= grados Brix, VitC= vitamina C, Licop= licopeno, Amb= ambientes, Rep= repeticiones, Gen= genotipos, CV= coeficiente de variación.
Valores transformados $\sqrt{x+Z}$

contraron diferencias, lo cual explica el 84.50%, por lo que se utilizó el modelo AMMI 1.

El 41.05% de la variación del rendimiento se atribuyó al ambiente, y las fuentes de variación genotipo e IGA representaron 27.76% y 31.19%, respectivamente. Ferreira *et al.* (2015) aconsejan la utilización del modelo SREG cuando los sitios (o ambientes) constituyen la fuente de variación más importante en relación con la contribución de los genotipos y la IGA sobre la variabilidad total, situaciones comunes en la práctica, por lo que se utilizaron modelos como el AMMI 1 y SREG para explorar la interacción genotipo ambiente e identificar genotipos estables.

El ambiente con mejores condiciones agronómicas fue el invernadero, donde las variables de contenido nutrimental y rendimiento tuvieron mejor expresión; en el ambiente campo abierto fue donde se obtuvieron resultados menos favorables. Esto podría deberse a las altas temperaturas que se presentaron en campo abierto (30 °C y mayor fluctuación entre el día y la noche), en comparación con las del invernadero, donde la temperatura fue controlada (26 °C).

Para un mejor sabor se requiere un contenido alto de azúcares y ácidos, ya que un contenido alto de ácidos y bajo de azúcares produce un sabor áci-

do, uno alto en azúcares y bajo en ácidos dan un sabor suave, y ambos bajos, dan un fruto insípido (San Martín, 2012). Baldwin *et al.* (1998) y Sánchez *et al.* (2015) indicaron que los tomates deben tener un pH entre 4 y 5, y un contenido en sólidos solubles de entre 4 y 6 grados Brix. Consideran que la relación entre los sólidos solubles y la acidez son un buen indicador para el sabor y el aroma de los tomates, y son los parámetros más importantes para la industria del tomate. En el Cuadro 5 se puede observar que los genotipos reúnen estos parámetros en los tres ambientes.

La ausencia de significancia en la fuente de variación ambiente en la variable grados Brix, se puede deber a que los frutos fueron cosechados en estado verde maduro (USDA Color Stage # 3) y se mantuvieron en temperatura ambiente hasta que alcanzaron el estado rojo (USDA Color Stage # 6) para su evaluación. Riga *et al.* (2007) encontraron que la temperatura tiene una influencia más fuerte en la calidad del tomate que la radiación fotosintéticamente activa. En su estudio, la temperatura se correlacionó fuertemente con la firmeza, la conductividad eléctrica, el contenido de sólidos solubles y los compuestos fenólicos totales, y se correlacionó débilmente con el pH, el peso seco, la acidez titulable y el contenido

Cuadro 4. Comparación de medias de variables de rendimiento y contenido nutricional de 21 genotipos, promedio de tres ambientes agronómicos.

Genotipo	RDT0 (t ha ⁻¹)	pH	°Bx (%)	VitC (mg/100g)	Licop (mg/100 g)
1	78.22 ^b	4.33 ^{abc}	4.24 ^{bc}	14.58 ^{abcde}	0.62 ^{cde}
2	94.11 ^{ab}	4.29 ^{bc}	4.82 ^a	12.09 ^{cde}	1.04 ^{abcd}
3	67.17 ^b	4.35 ^{abc}	4.42 ^{abc}	10.14 ^e	1.29 ^{ab}
4	97.94 ^{ab}	4.41 ^{abc}	4.40 ^{abc}	10.42 ^e	1.18 ^{abc}
5	82.96 ^{ab}	4.42 ^{abc}	4.82 ^a	11.35 ^{de}	0.84 ^{abcde}
12	71.08 ^b	4.51 ^{abc}	4.59 ^{abc}	13.43 ^{cde}	1.36 ^a
13	83.31 ^{ab}	4.37 ^{abc}	4.42 ^{abc}	13.97 ^{abcde}	0.59 ^{cde}
14	81.14 ^{ab}	4.42 ^{abc}	4.37 ^{abc}	14.65 ^{abcde}	0.81 ^{abcde}
15	92.09 ^{ab}	4.61 ^{abc}	4.27 ^{bc}	14.33 ^{abcde}	0.72 ^{bcde}
16	64.85 ^b	4.79 ^a	4.43 ^{abc}	18.40 ^a	0.57 ^{de}
17	58.47 ^b	4.47 ^{abc}	4.60 ^{abc}	12.88 ^{cde}	0.97 ^{abcd}
18	85.74 ^{ab}	4.35 ^{abc}	4.18 ^{bc}	11.91 ^{cde}	0.76 ^{bcde}
22	96.46 ^{ab}	4.48 ^{abc}	4.62 ^{abc}	16.33 ^{abc}	0.36 ^e
23	124.99 ^a	4.81 ^a	4.17 ^{bc}	18.10 ^{ab}	0.32 ^e
24	101.81 ^{ab}	4.42 ^{abc}	4.10 ^c	15.32 ^{abcd}	0.31 ^e
25	67.08 ^b	4.15 ^c	4.25 ^{bc}	16.25 ^{abc}	0.45 ^{de}
26	89.91 ^{ab}	4.72 ^{ab}	4.66 ^{ab}	16.25 ^{abc}	0.64 ^{cde}
27	81.93 ^{ab}	4.65 ^{ab}	4.42 ^{abc}	16.42 ^{abc}	0.51 ^{de}
28	70.91 ^b	4.56 ^{abc}	4.19 ^{bc}	15.07 ^{abcd}	0.66 ^{cde}
29	90.13 ^{ab}	4.33 ^{abc}	4.34 ^{abc}	10.21 ^e	0.63 ^{cde}
30	61.72 ^b	4.48 ^{abc}	4.17 ^{bc}	13.08 ^{cde}	0.90 ^{abcde}
Media	82.55	4.47	4.39	14.04	0.74

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes; RDT0= rendimiento, pH= potencial iones hidrógeno, °Bx= grados Brix, VitC= vitamina C, Licop= licopeno.

Cuadro 5. Comparación de medias de variables de rendimiento y contenido nutrimental en tres ambientes.

	RDT0 (t ha ⁻¹)	pH	°Bx (%)	VitC (mg/100g)	Licop (mg/100 g)
Campo abierto	56.34 ^b	4.51 ^b	4.38 ^a	12.54 ^b	0.69 ^b
Túnel	95.06 ^a	4.23 ^c	4.38 ^a	15.11 ^a	0.83 ^a
Invernadero	97.44 ^a	4.66 ^a	4.43 ^a	14.46 ^a	0.70 ^{ab}
Media	82.95				

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes; RDT0= rendimiento, pH= potencial iones hidrógeno, °Bx= grados Brix, VitC= vitamina C, Licop= licopeno.

Cuadro 6. Prueba de Gollob para rendimiento de 21 genotipos de tomate.

FV	SC	Porcentaje	Porcentaje acumulado	Prob F
Amb	66 495.06	41.05	41.05	<.0001
Gen	44 961.98	27.76	68.81	<.0001
Amb*Gen	50 515.10	31.19	100.00	0.0042
PC1	42 685.47	84.50	84.50	0.00016
PC2	7 829.63	15.50	100.00	0.91554
PC3	0.00	0.00	100.00	1.00000

FV= fuente de variación, SC= suma de cuadrados, Amb= ambientes, Gen= genotipos, Amb*Gen= Interacción genotipo-ambiente, PC= componente principal.

de vitamina C. La radiación fotosintéticamente activa sólo se correlacionó débilmente con la firmeza, el peso seco, el contenido de sólidos solubles y los compuestos fenólicos totales.

Brandt *et al.* (2006) mencionan que la biosíntesis de licopeno está influenciada por la temperatura. Si la temperatura de las frutas excede los 30 °C, el contenido de licopeno disminuye de manera significativa. Lo cual coincide con los resultados obtenidos, ya que el contenido de licopeno tuvo menor expresión en campo abierto.

Los atributos de calidad de fruto como color, sólidos solubles totales, índices de acidez, pH y firmeza son afectados por variaciones genotípicas, pero las

condiciones de crecimiento, irradiancia, estación de cultivo, nutrición, riego, temperatura, enfermedades y condiciones poscosecha son críticos para la calidad (Brandt *et al.*, 2006; Turhan y Seniz, 2009; San Martín *et al.*, 2012).

Análisis de estabilidad mediante el modelo AMMI 1 para rendimiento (Figura 1). En el biplot AMMI 1, la interpretación habitual es que los desplazamientos a lo largo de la abscisa indican diferencias en los efectos principales (aditivos), mientras que los desplazamientos a lo largo de la ordenada, indican diferencias en los efectos de interacción (Krishnamurthy *et al.*, 2015). La magnitud relativa y la dirección de los genotipos a lo

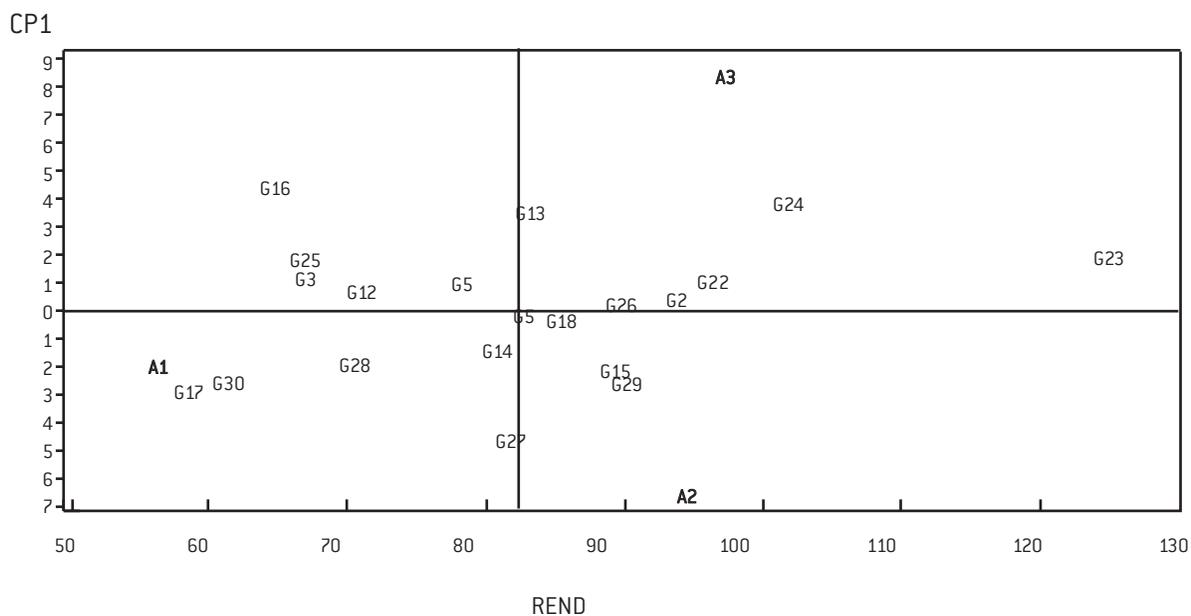


Figura 1. Biplot AMMI 1 para 21 genotipos de tomate evaluados en tres ambientes. CP1= componente principal 1; G= genotipo; A1= campo abierto; A2= macrotúnel; A3= invernadero; REND= rendimiento t ha⁻¹.

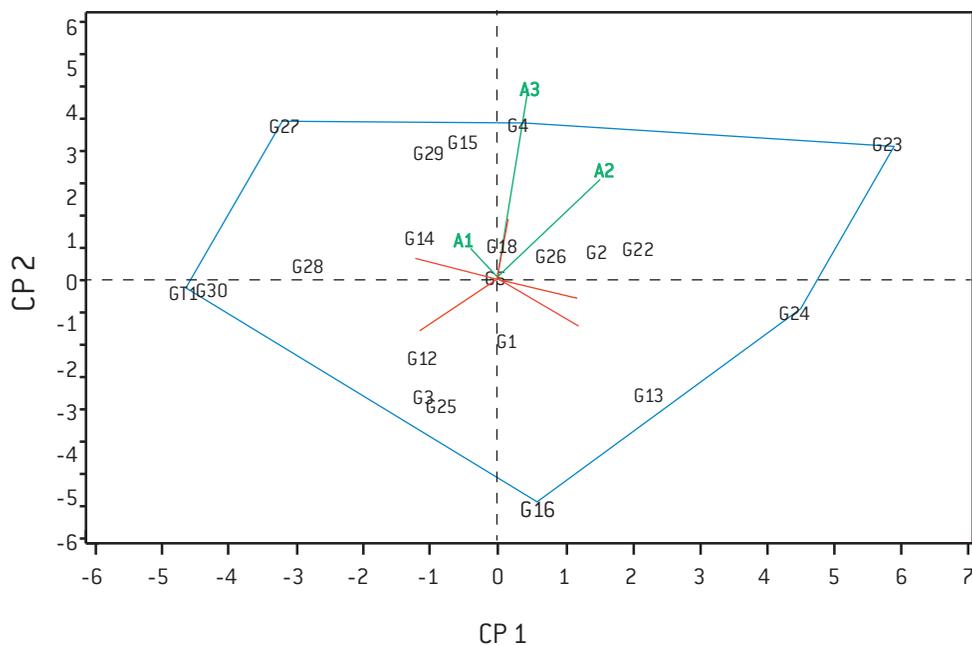


Figura 2. Biplot GGE de 21 genotipos de tomate evaluados en tres ambientes. CP1= componente principal 1; CP2= componente principal 2; G= genotipo; A1= campo abierto; A2= macrotúnel; A3= invernadero

largo del eje de abscisas y ordenadas en el biplot es importante para comprender el patrón de respuesta de los genotipos en todos los entornos (Asfaw *et al.*, 2009).

El genotipo 12 muestra estabilidad, pero tiene un rendimiento por debajo de la media, por lo cual no interesa. Los genotipos 5, 18, 26, 2 y 22 son los más estables y con un rendimiento superior a la media (82.43 t ha⁻¹).

Los genotipos 13, 23 y 24 tienen altas puntuaciones en el componente principal 1 (CP1), por lo tanto, son genotipos que se adaptan a ambientes favorables. Dado que el ambiente invernadero tiene CP1 positivos, este tiene interacción positiva con los genotipos anteriores.

Los genotipos 27, 15, 29 y 4 tienen puntuaciones CP1 negativas con altos efectos principales, el ambiente túnel tiene puntuaciones CP1 negativas, por lo tanto, se considera favorable para los genotipos antes mencionados.

Análisis de estabilidad y rendimiento con el método SREG o GGE (Figura 2). El biplot GGE se construye a partir de los primeros dos componentes principales (CP) del modelo SREG. El primer componente, cuando se encuentra altamente correlacionado con el efecto principal de genotipo, representa la proporción del rendimiento que se debe sólo a las características del genotipo. El segundo componente representa la parte del rendimiento debida a la interacción genotipo-ambiente (Ibáñez *et al.*, 2006).

El polígono se forma conectando los marcadores de los genotipos (23, 24, 16, 17, 30 y 27) que están más alejados del origen del biplot. Estos genotipos son los que más aportan a la interacción, es decir, los de más alto y más bajo rendimiento (Ibáñez *et al.*, 2006). Los genotipos 16, 17 y 30 quedan alejados de los ambientes de evaluación, por lo que estos genotipos son los que expresan menores rendimientos a través de todos los ambientes.

El genotipo ideal resulta aquel con alta puntuación en el CP1, asociado al alto rendimiento y puntuación cercana a 0 en el CP2, lo cual revela buena estabilidad del material probado a través de los diferentes ambientes (Ferreira *et al.*, 2015). Estos genotipos son: 5, 18, 26, 2 y 22.

CONCLUSIONES

Los genotipos 23 (Y41 (Y4xR1)) y 24 (F3 x (45x47)) pueden considerarse como ideales, por su adaptabi-

lidad en los tres ambientes. Para las variables contenido nutrimental de licopeno y vitamina C, destacaron los genotipos 12 (Rio Grande) y el 17 (K3), respectivamente. Los genotipos más estables fueron: 5 (S1xL1), 18 (L1), 26 (F3 (Y4xR1)), 2 (R1) y 22 ((45x47) R1). Ambos modelos coincidieron con estos resultados.

Tanto el modelo AMMI 1 como el SREG son igual de capaces para describir la interacción genotipo-ambiente, sin embargo, el AMMI 1 resulta ser más fácilmente interpretable.

LITERATURA CITADA

- ASFAW, A., Alemayehu, F., Gurum, F., Atnaf. M. (2009). AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties on to soybean production environments in Ethiopia. *Scientific Research and Essay*, 4(11): 1322-1330.
- BALDWIN, E. A., Scott, J. W., Malundo, T. M. M., Shewfelt, R. L., Tandom, K. S. (1998). Relationship between sensory and instrumental analysis for tomato flavor. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123(5): 906-915.
- BRANDT, S., Pék, Z., Barna, E., Lugasi, A., Helyes, L. (2006). Lycopene content and colour of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4): 568-572.
- CHECHETKIN, A. V., Vornianski, V.I., Pokusy, G.G. (1984). *Prácticas de bioquímica del Ganado y aves de corral*. (Ed. E. M. Moscú. 55 p.)
- CORNELIUS, P., Crossa, J., Seyedsardr, M.S. (1996). Statistical test and estimators of multiplicative models for genotype by environment interaction. In M.S. Kang and H.G. Gauch, Jr. (ed.), *Genotype-by environment interaction*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- CROSSA, J., Cornelius, P.L. (1997). Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. *Crop Science* 37(2): 406-415.
- FERRAUDO, G. M., Perecin, D. (2014). Mixed Model, AMMI and Eberhart-Russell Comparison via Simulation on Genotype × Environment Interaction Study in Sugarcane. *Applied Mathematics* 5: 2107-2119.
- FERREIRA, V., Grassi, E., Ferreira, A., di Santo, H., Castillo, E., & Paccapelo, H. (2015). Triticales y tricepiros: interacción genotipo-ambiente y estabilidad del rendimiento de grano. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.* 31(2), 93-104.
- GAUCH, H.G., Zobel, R.W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37: 311-326.
- GAUCH JR., H. G. (1988). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics*, 705-715.

- GAUCH Jr., H. G. (2006). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science* 46(4), 1488-1500.
- IBÁÑEZ, M. A., Cavanagh, M. M., Bonamico, N. C., & Di Renzo, M. A. (2006). Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(3), 83-93.
- KRISHNAMURTHY, S. L., Sharma, S. K., Sharma, D. K., Sharma, P. C., Singh, Y. P., Mishra, V. K., ... & Singh, R. K. (2016). Analysis of stability and G× E interaction of rice genotypes across saline and alkaline environments in India. *Cereal Research Communications*, 44(2), 349-360.
- LOZANO-RAMÍREZ, Á., Santacruz-Varela, A., San-Vicente-García, F., Crossa, J., Burgueño, J., & Molina-Galán, J. D. (2015). Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 337-347.
- LUNA-GUEVARA, M. L., & Delgado-Alvarado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 51-66.
- MARTÍN-HERNÁNDEZ, S., Ordaz-Chaparro, V. M., Sánchez-García, P., Beryl Colinas-Leon, M. T., & Borges-Gómez, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia* 46(3), 243-254.
- RIGA, P., Anza, M., & Garbisu, C. (2008). Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(1), 158-166.
- SÁNCHEZ ASPEYTI, D., Borrego, E. F., Zamora, V. V. M., Sánchez, C. H. J. D., Castillo, R. F. (2015). Estimación de la interacción genotipo-ambiente en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con el modelo AMMI. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(4): 763-778.
- SIAP (2020) <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> Fecha de consulta: 16 de noviembre del 2021.
- STEEL RGD, Torrie J.H. (1980). Principles and procedures of statistics. Ed. N. Y. McGraw-Hill, 481 pp.
- SUWARTO, Nasrullah (2011), Analysis of effect of genotype x environment interaction on rice grain's iron content in Indonesia using graphical GGE-biplot method. *Electron. J. Plant Breed* 2: 288-294.
- TURHAN, A. & Şeniz, V. (2009). Estimation of certain chemical constituents of fruits of selected tomato genotypes grown in Turkey. *African Journal of Agricultural Research* 4(10), 1086-1092.
- WINSOR, G. W. (1979, June). Some factors affecting the quality and composition of tomatoes. *In: Symposium on Quality of Vegetables* 93: 335-346.
- ZOBEL, R. W., Wright, M. J., & Gauch Jr, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80(3), 388-393.