

INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN ARROZ PARA IDENTIFICAR MEGA-AMBIENTES Y AMBIENTES IDEALES MEDIANTE EL MODELO DE REGRESIÓN POR SITIOS Y BILOT

Marco Acevedo Barona¹, Rosa Álvarez², Rubén Silva¹, Orlando Torres³ y Edicta Reyes²

RESUMEN

La selección de cultivares basada en efectos genéticos y ambientales es insuficiente para el fitomejorador cuando no considera la interacción genotipo por ambiente (IGA). Estudios de IGA permiten identificar exitosamente materiales con alto desempeño para varios o específicos ambientes. Los objetivos de este trabajo fueron detectar la IGA para identificar mega-ambientes y su relación con los genotipos, utilizando el biplot GGE obtenido del análisis del modelo de regresión por sitio (SREG) para el rendimiento en cultivares arroz con riego en Venezuela. En 12 ambientes distribuidos en las principales zonas productoras se evaluaron durante 2010-2011 seis genotipos de los cultivares más sembrados de entonces y de la actualidad para la producción comercial de arroz del país. Se usó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en unidades experimentales de 20 m². El análisis de varianza del modelo de SREG detectó significancia en los dos primeros componentes principales que explicaron cerca del 73 % de la variación en IGA. El biplot GGE identificó dos mega-ambientes con 'Soberana FL' y 'SD 20A' como mejores cultivares. El biplot GGE "medias y estabilidad" mostró a la línea 'AP06B041' como el genotipo más estable y al cultivar 'Soberana FL' como el "genotipo ideotipo" con alta productividad media y estable fenotípicamente. Las mejores localidades de pruebas para ensayos de mejoramiento genético de arroz en Venezuela, resultaron en el estado Guárico el Campo experimental del INIA en ambos periodos (seco y lluvioso) y en Portuguesa el Campo Experimental de Sehiveca para el periodo lluvioso.

Palabras clave adicionales: Estabilidad fenotípica, GCE, localidades de prueba, *Oryza sativa*, SREG

ABSTRACT

Interaction genotype environment in rice to identify mega and ideal environments by the model of site regression and biplot

The selection of cultivars based on genetic and environmental effects is insufficient for the plant breeder when they do not consider the interaction genotype by environment (GxE). The GxE studies allow appropriate identification of high performance materials for several or specific environments. The objectives of this study were to detect the GxE to identify mega-environments and their relationship with the genotypes, using the GGE biplot obtained from the analysis of the regression-by-site model (SREG) for yield in irrigated rice cultivars in Venezuela. In 12 environments, distributed in the main producing areas, we evaluated during 2010-2011 six genotypes of the most sown cultivars in that time and the present for the commercial production of rice in the country. A randomized complete blocks design with three repetitions was used with experimental units of 20 m². The analysis of variance of the SREG model detected significance in the first two main components that explained almost 73 % of the GxE variation. The GGE biplot identified two mega-environments with 'Soberana FL' and 'SD 20A' as the best cultivars. The GGE biplot "means and stability" showed the line 'AP06B041' as the most stable genotype and the cultivar Soberana FL as the "ideotype genotype" with high average productivity and stable phenotypically. The best localities of tests for trials of genetic improvement of rice in Venezuela resulted in the Guárico State Experimental Field of INIA in both periods (dry and rainy), and in the Portuguesa State Experimental Field of Sehiveca for the rainy period.

Additional key words: GCE, *Oryza sativa*, phenotypic stability, SREG, test locations

INTRODUCCIÓN

El arroz se cultiva en las diferentes regiones de

Venezuela bajo diversas tecnologías de manejo y ambientes que podrían afectar la expresión del fenotipo de los materiales genéticos. La expresión

Recibido: Abril 23, 2018

Aceptado: Octubre 29, 2018

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola (INIA). CIAE Guárico. Calabozo. Apdo. 14.
e-mail: macevedo@inia.gob.ve, rjsilva@inia.gob.ve

² Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola (INIA). CIAE Portuguesa. Araure. Apdo. 102.
e-mail: ralvarez@inia.gob.ve, ereyes@inia.gob.ve

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola (INIA). CIAE Barinas. Apdo. 170. Barinas. Venezuela.
e-mail: otorres@inia.gob.ve.

de cualquier carácter fenotípico, como el rendimiento de granos en los cereales, está en función del control genotípico, ambiental y de la interacción genotipo por ambiente (IGA) (Ramalho et al., 2012). La presencia de IGA es una consecuencia del comportamiento distinto de los genotipos en las diferentes condiciones ambientales. Los programas de mejoramiento genético, normalmente evalúan cientos de genotipos en diferentes ambientes, donde probablemente van a ser sembrados comercialmente y de interés para el fitomejorador; este proceso de evaluación y selección es dinámico a través del tiempo y espacio.

Los caracteres cuantitativos, como el rendimiento de granos a menudo presentan IGA significativa. Esta puede ser de naturaleza simple o compleja. En este sentido, Falconer y Mackay (1996) explican que cuando un mismo conjunto de genes se expresan en diferentes ambientes, las diferencias en las respuestas pueden ser atribuidas a la heterogeneidad de las varianzas genéticas y experimentales o por ambas (interacción simple), mientras que cuando diferentes grupos de genes se expresan en ambientes distintos, esa diferencia puede ser atribuida a las inconsistencias de las correlaciones genéticas del carácter estudiado en ambos ambientes. Generalmente, cuando el objetivo es desarrollar nuevos cultivares, la ocurrencia de IGA de tipo compleja es común, motivo por el cual son invertidos grandes recursos en investigación para la evaluación y selección de genotipos en diversos ambientes contrastantes en años sucesivos (Bernardo, 2002).

La presencia de IGA de tipo compleja, generalmente reduce la correlación entre los valores fenotípicos y genotípicos, es decir disminuye la precisión de selección y recomendación de genotipos adaptados y estables (Yan y Holland, 2010). En este sentido, adaptabilidad es definida como la capacidad de los genotipos de aprovechar ventajosamente el estímulo ambiental, mientras que la estabilidad está referida a la capacidad del genotipo de mostrar un comportamiento altamente previsible de acuerdo con el ambiente (Cruz y Regazzi, 2001).

En la literatura existen varios modelos biométricos y cuantitativos propuestos que permiten interpretar la IGA, los modelos de análisis multiplicativo que exploran la respuesta

de los genotipos a ambientes específicos o a diversos ambientes poseen criterios de análisis más detallados para el estudio de este fenómeno (EMBRAPA, 2004).

Crossa et al. (1990) y Gauch (1992) proponen que la aplicación de modelos multivariados pueden ser útiles para interpretar el análisis de la IGA. Los mismos, recomiendan el modelo AMMI (efectos principales de tipos aditivos e interacción multiplicativa), donde los efectos de genotipos y ambientes son aditivos y lineales, permitiendo el estudio por procedimientos de análisis de varianza convencional; mientras que la IGA tiene efectos multiplicativos que pueden ser explicados a través del análisis de componentes principales.

Yan et al. (2000) plantean una modificación del modelo AMMI convencional, conocido como modelo SREG (regresión por sitio) que consiste en un análisis multiplicativo de regresión para localidades en GGE biplot (genotipos e interacción genotipo por ambiente) utilizando análisis de componentes principales, donde el biplot está construido por los dos primeros componentes del análisis. Cuando el primer componente principal está altamente correlacionado con el efecto del genotipo, se puede decir que una alta proporción de la variable analizada es atribuida a las características del genotipo, mientras que el segundo componente principal representa la parte del rendimiento debida a la IGA.

El biplot GGE permite al mejorador de plantas identificar genotipos que posean adaptación amplia o específica. Con el modelo biplot GGE “media y estabilidad” se consigue aproximar con alta precisión el estudio del “genotipo ideal”, asociado al genotipo que cumple con las premisas de alta productividad y estabilidad fenotípica. Este modelo agrupa el genotipo a la IGA de efecto multiplicativo a través del modelo SREG, en la actualidad es ampliamente utilizado en estudios de IGA para identificar mega-ambientes, adaptabilidad y estabilidad de genotipos.

La comparación entre ambos modelos permite señalar que el GGE explica una proporción importante de la suma de cuadrado del efecto principal del genotipo más el efecto de la IGA, mientras que en el modelo AMMI es posible observar el efecto de la IGA más el ambiente. Oliveira et al. (2010), agregan que el biplot del modelo GGE, en ambos ejes utiliza una misma

escala, por lo tanto no solo proporciona adaptabilidad y estabilidad de cada fenotipo, sino también el desempeño relativo de un genotipo en cualquier ambiente evaluado. Este modelo permite agrupar los ambientes en mega-ambientes, definido por Yan y Kang (2003) cuando diferentes genotipos se adaptan a distintos grupos de ambientes y la variación entre grupos es mayor que dentro de ellos. Además permite agrupar los genotipos semejantes e identificar el genotipo con mayor potencial en cada grupo de ambientes o mega-ambientes. El gráfico biplot GGE captura la mayor proporción del valor real de los efectos de genotipos y su interacción con los ambientes, logrando hacer al modelo altamente descriptivo (Yan et al. 2000).

El gráfico biplot GGE permite determinar tres aspectos importantes: (a) la relación IGA, logrando el agrupamiento de genotipos y ambientes con semejante comportamiento, mostrando el genotipo con mayor potencial y su relación con cada sub-grupo de ambientes (mega-ambientes); (b) la interrelación entre ambientes, facilitando la identificación de ambientes favorables y desfavorables para evaluar cultivares y (c) la interrelación entre genotipos, facilitando la comparación entre ellos y de su ordenamiento para los parámetros de estabilidad y adaptabilidad (Yan, 2002).

Colombari et al. (2013) señalan que la adaptabilidad y estabilidad de los cultivares de arroz por ellos analizados, no son idénticas en los multi-ambientes debido a la IGA y agregan como más importante la interacción genotipo por localidad. En Venezuela trabajos publicados sobre el análisis de IGA en arroz son escasos, Acevedo et al. (2010) determinaron la adaptabilidad y estabilidad fenotípica analizando la IGA en materiales de arroz con riego y concluyeron que el cultivar SD-20A fue el más adaptado, las líneas PN00B037 y PN01B034 fueron las más estables de adaptabilidad intermedia, mientras que la localidad Sabanetica, estado Portuguesa, fue la que mejor discriminó genotipos de arroz.

La literatura internacional reporta estudios de IGA en arroz, utilizando el modelo biplot GGE, en países como Estados Unidos, Panamá (Camargo et al., 2011a; 2011b), Colombia (Ramos et al., 2009) y Brasil (Branquinho et al., 2013, Donoso-Nanculao et al., 2016) para identificar mega-ambientes, adaptabilidad y estabilidad en

genotipos de arroz.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la IGA para identificar mega-ambientes, localidades y genotipos ideales de arroz en las principales regiones productoras de Venezuela basado en rendimiento de granos utilizando el modelo SREG y biplot GGE.

MATERIALES Y MÉTODOS

El conjunto de datos analizados proviene de los ensayos de validación agronómica de cultivares (EVAC) ejecutados en las dos grandes regiones productoras de arroz de Venezuela. La región de los llanos Centrales (estado Guárico) dentro del Sistema de Riego Río Guárico (SRRG), la región de los llanos Centro-Occidentales dentro de los Sistemas de Riego, las Majaguas (estado Portuguesa) y Sistema de Riego Santo Domingo (estado Barinas) y aéreas de influencia. En el Cuadro 1, se presentan las principales características climáticas en medias anuales por localidad.

De forma general, exceptuando las localidades de los estados Guárico y Barinas que presentan valores contrastantes de precipitación y temperatura media anual, las tres localidades ubicadas en el estado Portuguesa muestran similares características agroclimáticas para precipitación y temperatura. Sin embargo, no fueron consideradas las características de suelo, ni las prácticas de manejo agronómico que en conjunto podrían afectar la respuesta de los genotipos. No obstante, los factores agroclimáticos en general cobran menor importancia en el modelo propuesto por Yan et al. (2000), ya que el efecto principal de genotipo y la IGA son considerados conjuntamente, siendo la capacidad adaptativa de los genotipos más importante a la hora de la selección de cultivares y formación de mega-ambientes que las condiciones agro-climáticas (Camargo et al. 2011a; Silva y Benin, 2012).

Fueron evaluados los siguientes seis genotipos: “PN04I051” y “Soberana FL” de INIA-Fundarroz, “AP06B041” de Aprozello, y los testigos comerciales “Venezuela 21”, “D’Sativa” y “SD-20A” de Fundación Danac. Los ensayos se realizaron en cinco localidades y dos épocas de siembra durante los años 2010 y 2011. Se combinaron 4 localidades en el período seco 2010, 5 localidades en el período de lluvia 2010 y 3

localidades en el período de lluvia 2011 lo que generó un total de 12 ambientes (Cuadro 2).

Cuadro 1. Principales características climáticas* de las localidades para el estudio de la IGA en arroz de riego en Venezuela, medias anuales de 2010-2011

Estado	Localidad Campo Experimental	Ubicación geográfica		Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)
		N	W			
Guárico	INIA Guárico	08°44'	67°31'	80	924,6	28,3
Portuguesa	INIA Portuguesa	09°36'	69°14'	232	1.618,8	27,4
Portuguesa	Sehiveca	09°36'	69°09'	185	1.380,2	28,1
Portuguesa	Asoportuguesa	09°26'	69°03'	131	1.371,6	27,5
Barinas	INIA Barinas	08°33'	70°08'	156	1.415,7	26,8

*INIA-Agrometeorología

Cuadro 2. Ambientes de evaluación de seis genotipos de arroz con riego en Venezuela, en diferentes períodos y años

Localidad	Año		
	2010	2010	2011
	Periodo seco	Periodo lluvia	Periodo lluvia
INIA Guárico	x	x	x
INIA Portuguesa	-	x	x
Portuguesa Sehiveca	x	x	x
Asoportuguesa	x	x	-
INIA Barinas	x	x	-

x: ambiente evaluado

Los ensayos fueron instalados en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por un área de 20 m² de cultivo, siendo cosechada una porción efectiva de 12 m², excluyendo el efecto de bordura. El manejo agronómico de los ensayos fue similar al empleado en las siembras comerciales de cada localidad. Se utilizaron dos épocas de siembra al año, la del periodo seco que va de noviembre a abril y la del periodo lluvioso de mayo a octubre, y en ambas el arroz se cultivó bajo riego empleando semilla pre-germinada en densidad promedio de 100 kg·ha⁻¹. La variable analizada fue el rendimiento en granos paddy expresado en kilogramos por hectárea, ajustado al 12 % de humedad en cada parcela.

Fueron realizados los análisis de varianza individual por localidades y posteriormente el análisis conjunto de localidades. El modelo lineal del análisis de varianza en diseño de bloques completos al azar para evaluar genotipos en varios ambientes fue el siguiente: $Y_{ijk} = \mu + g_i + \beta_{(j)k} + a_j$

+ $(ga)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, donde, Y_{ijk} se refiere al valor fenotípico del genotipo i , evaluado en k repeticiones y j ambientes, mientras μ , g_i , a_j , $(ga)_{ij}$, representan la media general, efecto de genotipos, de ambientes e IGA, respectivamente; $\beta_{(j)k}$ es el efecto de repetición dentro de ambiente; y ε_{ijk} el error experimental asociado a la ijk -ésima observación.

La descomposición del valor fenotípico (Y_{ijk}) como el expresado en el modelo lineal aditivo, no provee mayor información sobre el comportamiento de un genotipo en los diferentes ambientes y sólo permite cuantificar la magnitud de la IGA; es por ello que el análisis de adaptabilidad y estabilidad permite explicar el desempeño relativo de un genotipo a otro en los diferentes ambientes, además de identificar sub-grupos dentro de los ambientes considerados.

Modelo SREG, utilizando biplot GGE. El modelo utilizado en este trabajo se corresponde con el propuesto por Yan et al. (2000), basado en un biplot GGE, el cual considera el efecto principal del genotipo (G) como de efecto multiplicativo junto con la interacción genotipo por ambiente (GxA), donde la capacidad adaptativa de los genotipos es más importante para la selección y formación de mega-ambientes que las condiciones agro-climáticas (Camargo-Buitrago et al. 2011a). El biplot está construido por los dos primeros componentes de un análisis de componentes principales, utilizando el modelo de regresión por sitios (SREG), según el siguiente modelo lineal: $Y_{ij} - \bar{y}_j = (\lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1}) + (\lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2}) + \varepsilon_{ij}$, donde Y_{ij} corresponde al promedio del rendimiento del genotipo i en el ambiente j ; \bar{y}_j es la media de los genotipos en el ambiente j (media

marginal); $\lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1}$ representa el primer componente principal (Cp1); $\lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2}$ representa el segundo componente principal (Cp2); λ_1 y λ_2 son los autovalores asociados a los Cp 1 y Cp 2, respectivamente; ξ_{i1} y ξ_{i2} son los autovectores de genotipos i para el primero y segundo componente principal, respectivamente; η_{j1} y η_{j2} son los autovectores de los ambientes j para el primero y segundo componente principal, respectivamente; ε_{ij} es el error experimental asociado al genotipo i en el ambiente j .

En el modelo SREG el efecto principal de genotipo más el efecto de la IGA fueron absorbidos dentro de los términos bilineales desarrollados por Burgueño et al. (2001). En este trabajo se utilizó el algoritmo desarrollado por dichos autores para la SREG y Biplot GGE con la prueba de significancia de Gollob (1967), para cada componente principal, mediante el paquete estadístico SAS, versión 8.1 (Cary, NC, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de variancia del combinado y del modelo SREG GGE.

En el análisis de variancia conjunto presentado en el Cuadro 3 se observan diferencias significativas ($P \leq 0,01$) para las fuentes de variación ambiente, genotipo, e interacción genotipo por ambiente, lo que indica existencia de variabilidad ambiental, variabilidad genética entre los materiales y que el carácter rendimiento de granos se vio influenciado por la variación ambiental en al menos uno de los genotipos considerados. La variación total de los datos, representada por la proporción de las fuentes de variación genotipos, ambientes e IGA en relación a la suma de cuadrados de tratamientos, indica que la mayor variación estuvo representada por el ambiente con 68 %; los efectos de genotipo e IGA fueron de menor magnitud, pero importantes, con 6 y 26 %, respectivamente. Estos resultados se asemejan a los reportados por Gauch y Zobel (1996), quienes señalan que, en general, las fuentes de variación ambiente, genotipo e IGA representan en ese orden cerca de 70, 10 y 20 %. La media de rendimiento del análisis conjunto fue $5.354 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, superior al promedio nacional y varió entre 3.856 y $7.936 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para los ambientes INIA Portuguesa e INIA Guárico, respectivamente. El coeficiente de variación

resultó relativamente bajo (13,6 %), indicando buena precisión de los ensayos, considerando que el tipo de carácter estudiado es cuantitativo y altamente influenciado por el ambiente.

Cuadro 3. Análisis de varianza para rendimiento de granos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de seis genotipos de arroz de riego en 12 ambientes de Venezuela, años 2010-2011

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Ambiente (A)	11	16.182.654**
Bloques/A [$12*(3-1)$]	24	966.798 ns
Genotipo (G)	5	2.843.446**
IGA (GxA)	55	1.234.095**
Error [$12*(6-1)*(3-1)$]	120	627.974
Media		5.354
CV%		13,60

** Probabilidad para $P \leq 0,01$ por la prueba de F de Fisher

El análisis de varianza del modelo SREG-GGE (Cuadro 4) de la IGA, mostró en total cinco componentes principales, siendo el Cp 1 responsable por cerca del 45 % y el Cp 2 por 28 % de la variación de la interacción, mostrándose ambos significativos, por la prueba F de Gollob, según el algoritmo de Burgueño et al. (2001). La suma de ambos componentes resultó en aproximadamente 73 %, lo cual explicó gran parte de la IGA. Los restantes ejes sumaron cerca de 27 %, resultaron no significativos y forman parte del “ruido”, no explicado por el modelo.

En la Figura 1 se presenta el biplot GGE del modelo SREG de la distribución espacial de los ambientes de prueba de arroz de riego con base en el análisis de la IGA, donde además se muestra el desempeño de los genotipos con mejores rendimientos (conocido como genotipos vencedores) y menores rendimientos para el análisis de mega-ambientes.

Basado en el análisis de esta figura, los genotipos vencedores fueron las variedades ‘Soberana FL’ y ‘SD 20A’, ubicadas a la derecha con mayores valores positivos de Cp 1 y promedios de rendimiento de granos, mientras los genotipos ‘Venezuela 21’ y la ‘Línea PN04I051’ ubicados a la izquierda presentaron los valores negativos de Cp 1 e inferiores desempeños. La

disposición de las líneas verdes que pasan por el origen del biplot GGE, permitió distribuir los 12

ambientes de arroz de riego en cuatro grandes sectores.

Cuadro 4. Análisis de varianza del modelo SREG-GGE, con el desdoblamiento de la suma de cuadrados de la IGA para el rendimiento de granos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de seis genotipos de arroz de riego en 12 ambientes de Venezuela, años 2010-2011

Fuente de variación	Grados de libertad	Autovalor	Proporción IGA (%)	Proporción IGA acumulada (%)	Cuadrados medios	F_{Gollob}
CP 1	15	36.768.072,19	44,79	44,79	2.451.204,81	4,62**
CP 2	13	22.965.027,66	27,98	72,77	1.766.540,59	3,33**
CP 3	11	8.835.173,67	10,76	83,53	803.197,61	1,51 ns
CP 4	9	8.057.719,59	9,82	93,35	895.302,18	1,69 ns
CP 5	7	5.466.514,38	6,65	100,00	780.930,63	1,47 ns

** y ns: significativo al 1% y no significativo, respectivamente, por la prueba F de Gollob

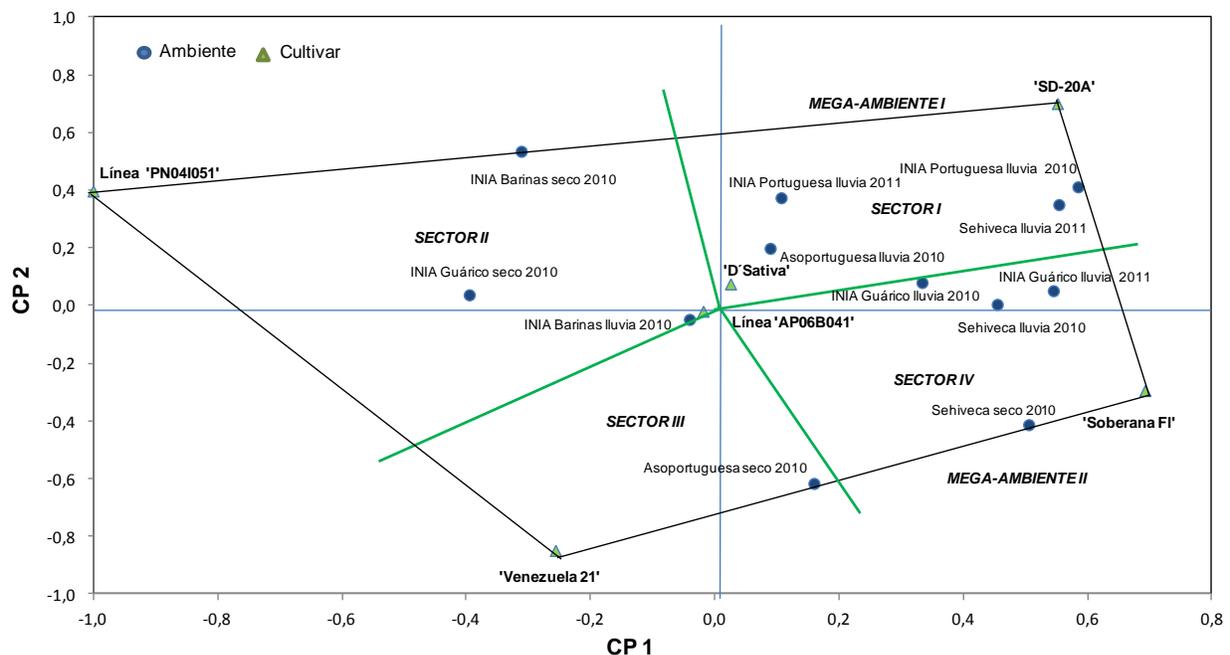


Figura 1. Análisis de mega-ambientes por el Biplot GGE del modelo SREG de seis genotipos de arroz de riego con mayor y menor desempeño en 12 ambientes de Venezuela, años 2010-2011

Yan y Rajcan (2002) establecieron que los ensayos multi-ambientales conducidos a través de varias localidades y años son necesarios para verificar el patrón de agrupación de dichos ambientes dentro de mega-ambientes e identificar genotipos con alto desempeño en cada mega-ambiente. En este sentido, se comprobó que el cultivar 'Soberana FL' mostró mejor desempeño en el periodo lluvioso durante ambos años en los

ambientes de los estados Guárico y Portuguesa, y su mejor adaptabilidad ocurrió para ambos periodos seco y lluvioso del 2010. La variedad 'SD 20A' alcanzó rendimientos consistentemente superiores en el periodo lluvioso de los años 2010 y 2011 en los ambientes del estado Portuguesa. Los cultivares 'Venezuela 21' y 'Línea PN04I051' no fueron consistentes en su desempeño en los diferentes ambientes.

Samonte et al. (2005) analizaron el modelo SREG biplot GGE usando seis cultivares de arroz en 12 ambientes del estado de Texas (USA), consideraron un “genotipo deseable” como aquel que presenta consistentemente alto desempeño en las mismas localidades a través de los años. Tomando como referencia este concepto, en los 12 ambientes considerados para la evaluación de arroz en Venezuela, se formaron dos mega-ambientes (Figura 1), el mega-ambiente I donde el genotipo ganador fue el SD-20A formado por los ambientes ubicados principalmente en el estado Portuguesa (INIA Portuguesa lluvia 2010, INIA Portuguesa lluvia 2011, Asoportuguesa lluvia 2010 y Sehiveca Portuguesa lluvia 2011) y el mega-ambiente II donde el genotipo ganador fue Soberana FL y agrupó a las localidades INIA Guárico lluvia 2010, INIA Guárico lluvia 2011, Sehiveca lluvia 2010 y Sehiveca seco 2010.

Los materiales ‘Línea PN04I051’, ‘Venezuela 21’ y ‘Línea AP06B041’ presentaron desempeños inferiores en ambos mega-ambientes en virtud de que presentaron correlación negativa y ángulos mayores de 90° con respecto a Soberana FL y SD 20 (en la Figura 1, este ángulo es el formado entre las líneas imaginarias que unen el origen del gráfico con cada uno de los genotipos comparados).

La variedad ‘SD 20A’ presentó menor desempeño en el periodo seco en todos los ambientes, por lo que se puede decir que presenta adaptabilidad específica para ambientes en periodo lluvioso. Por el contrario, ‘Soberana FL’ presentó una adaptación más amplia.

Evaluación de los genotipos por el biplot GGE. En la Figura 2 se presenta el modelo SREG donde el biplot GGE “medias-estabilidad” y el “genotipo ideotipo” proyectan la distribución de los genotipos de acuerdo al eje de ambiente-medio (EAM), recta de trazo continuo que pasa por el origen del biplot GGE paralelo al Cp1; el mismo determina adaptabilidad y estabilidad, y la figura permite evaluar eficientemente los genotipos en ambos aspectos (Yan, 2011). El análisis de asociación entre el Cp 1 y las medias de rendimiento mostró correlación alta ($r = 0,96$). Sobre el eje EAM, al extremo derecho donde los valores del Cp 1 son mayores y positivos, se ubica una flecha (centro de los círculos concéntricos); ese punto corresponde al “ambiente-medio”, que representa la media de todos los genotipos dentro

de los mega-ambientes e indica el sentido de mayor desempeño promedio de los genotipos. Esto demuestra que los materiales genéticos con mayor desempeño promedio en orden decreciente fueron: ‘Soberana FL’, ‘SD 20A’, ‘D-Sativa’, ‘Línea AP06B041’, ‘Venezuela 21’ y la línea ‘PN04I051’.

Las líneas negras punteadas perpendiculares al EAM proyectadas sobre cada genotipo (cuadrados verdes) indican la variabilidad de desempeño de los mismos, cuando menor es su proyección mayor su estabilidad. Así, los cultivares más estables en orden decreciente, fueron: Línea ‘AP06B041’, ‘D Sativa’, ‘Soberana FL’, Líneas ‘PN04I051’, ‘SD 20A’ y ‘Venezuela 21’, demostrando que los materiales más estables fenotípicamente fueron Línea ‘AP06B041’ y ‘D Sativa’, mientras los más inestables fueron ‘SD 20A’ y ‘Venezuela 21’.

El ideotipo es un “genotipo ideal” que presenta alto desempeño promedio, igual o superior al ambiente medio (flecha negra en la Figura 2), ubicado cerca de los círculos concéntricos sobre el EAM con estabilidad fenotípica para un determinado ambiente o grupo de ambientes. En la Figura 2, el cultivar ideotipo fue la variedad ‘Soberana FL’ que presentó rendimiento de granos superior al ambiente medio y se ubicó dentro de los círculos concéntricos. Esto destaca otra bondad del cultivar ‘Soberana FL’, además de su alta calidad molinera de grano, latencia media de 20 días (inferior al promedio de 30 días de la mayoría de materiales) y ciclo de 115 días (inferior al promedio nacional de 120 días). (Acevedo et al., 2013).

Evaluación de las localidades por el biplot GGE. En la Figura 2 se identifican los ambientes de prueba o de ensayo (rombos azules) que fueron representativos y discriminatorios de los genotipos en cada mega-ambiente, lo cual puede permitir el incremento en la eficiencia de selección de materiales de arroz con riego en Venezuela.

Los ambientes más discriminantes de genotipos en orden decreciente fueron INIA Portuguesa lluvia 2010, Sehiveca lluvia 2011 e INIA Guárico lluvia 2011 que presentaron vectores con mayor magnitud y mayores valores de CP1 con 0,6084; 0,5556 y 0,5465, respectivamente, mientras que los menos discriminantes fueron INIA Barinas lluvia 2010 y Asoportuguesa lluvia 2010. En estos últimos

ambientes los genotipos respondieron de manera similar y no se observaron las diferencias genéticas, por lo que no son recomendadas como sitios de prueba en ensayos de mejoramiento. Resultados similares fueron señalados por Acevedo et al. (2010), sobre la localidad INIA Barinas que contribuyó poco con la interacción, es decir, en su investigación todos los materiales presentaron comportamiento similar.

Los ambientes representativos en orden decreciente fueron INIA Guárico seco 2010, Sehiveca lluvia 2010, INIA Guárico lluvia 2011 e

INIA Guárico lluvia 2010, los cuales formaron pequeños ángulos con relación al EAM. Se concluye que estos ambientes son más representativos que el resto de los ambientes evaluados.

En general, los ambientes discriminatorios y representativos ideales para ensayos y selección de genotipos adaptados de arroz con riego en Venezuela serían los ubicados en los Campos Experimentales del INIA Guárico en ambos periodos, y Sehiveca en Portuguesa principalmente para el periodo lluvioso.

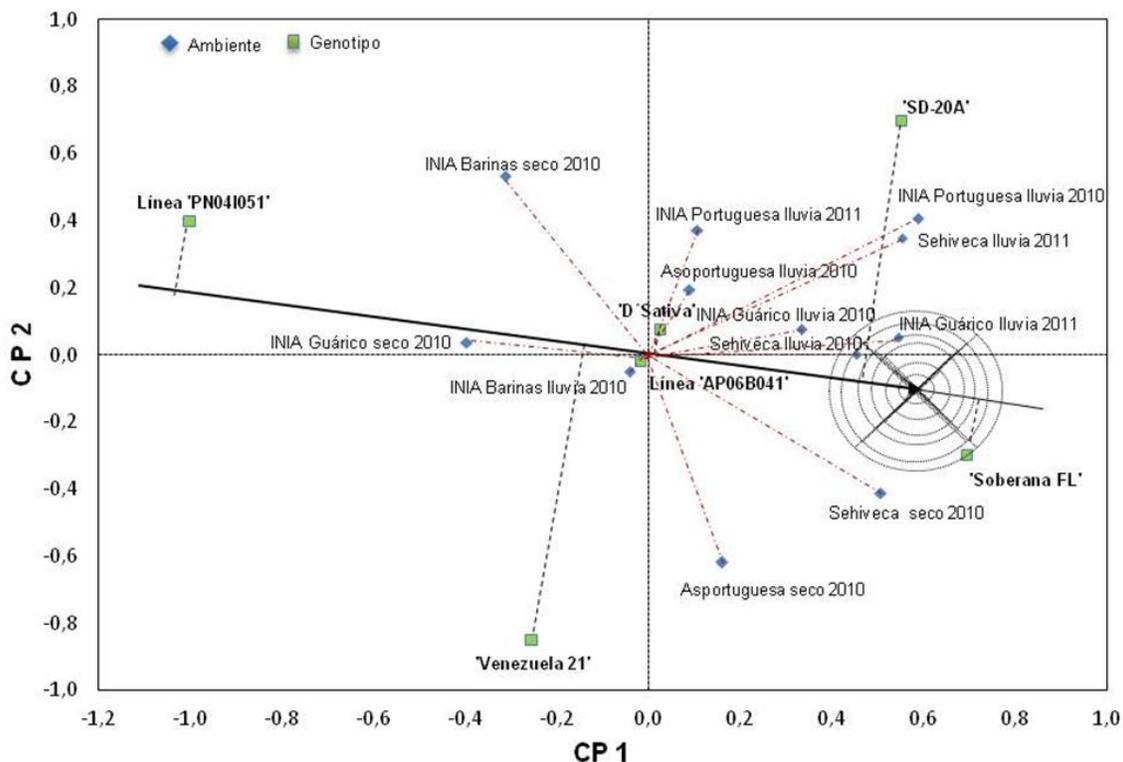


Figura 2. Modelo biplot GGE "Medias-Estabilidad" e "Idiotipo Ideal" de seis genotipos de arroz de riego en 12 ambientes de Venezuela, años 2010-2011

CONCLUSIONES

Se logró la identificación de dos mega-ambientes que agruparon los 12 ambientes de evaluación de arroz para riego en Venezuela.

Los cultivares 'Soberana FL' y 'SD 20A' fueron los genotipos ganadores (los de mejor rendimiento) en los mega ambientes.

Se identificó al cultivar 'Soberana FL' como el "genotipo ideotipo" con alto promedio de rendimiento de granos y estable fenotípicamente.

Se identificaron como localidades ideales para ensayos y selección de genotipos de arroz del conjunto de ambientes analizados los campos experimentales del INIA-Guárico para ambos periodos y Sehiveca en Portuguesa para el periodo lluvioso.

LITERATURA CITADA

1. Acevedo, M., E. Reyes, W. Castrillo, O. Torres, C. Marín, R. Álvarez, O. Moreno y E.

- Torres. 2010. Estabilidad fenotípica de arroz de riego en Venezuela utilizando los modelos Lin-Binns y AMMI. *Agro. Trop.* 60: 131-138.
2. Acevedo, M. R., Álvarez, O. Torres M., Salazar, I. Pérez Almeida, E., y O. Moreno. 2013. "Soberana FL": Cultivar de arroz de riego para Venezuela. *Agro. Trop.* 63(1-2): 27-35.
 3. Bernardo, R. 2010. *Breeding for Quantitative Traits in Plants*. Stemma Press. Woodbury, MN, USA.
 4. Burgueño J., J. Crossa y M. Vargas. 2001. SAS Programs for graphing GE and GGE biplot. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit CIMMYT, México. pp. 29-36.
 5. Branquinho, R., A. Heinemann, A. Pereira de Castro, J. Colombari Filho, J. Duarte, P. Santos et al. 2013. AMMI & GGE Biplot. Uma análise comparativa da avaliação de locais de teste de genótipos de arroz. 8° Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado. UFSM. Santa Maria, Brasil. pp. 65-68.
 6. Camargo-Buitrago I., E., Mc Intire y R. Gordón-Mendoza. 2011a. Identificación de mega-ambientes para potenciar el uso de genotipos superiores de arroz en Panamá. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 46(9): 1601-1069.
 7. Camargo-Buitrago I., E. Mc Intire y R. Gordón-Mendoza. 2011b. Identificación de ambientes representativos y discriminatorios para seleccionar genotipos de arroz mediante biplot GGE. *Agronomía Mesoamericana* 22(2): 245-255.
 8. Colombari Filho, J., M. de Resende, O. de Moraes, A. de Castro, E. Guimarães, J. Pereira et al. 2013. Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability and grain yield. *Euphytica* 192: 117-129.
 9. Crossa, J., H. Gauch Jr. y R. Zobel. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop. Sci.* 30(3): 493- 500.
 10. Donoso-Ñanculao, G., M. Paredes, V. Becerra, C. Arrepol y M. Balzarini. 2016. GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. *Chilean J. Agric. Res.* 76(2): 152-157.
 11. Gauch, H. y R. Zobel. 1996. AMMI analysis of yields trials. *In: M. Kangs y H. Gauch (eds.). Genotype by Environment Interaction*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 85-122.
 12. Gollob, H. 1967. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika* 33: 73-115
 13. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Unidad de Agro Meteorología. <http://agrometeorologia.inia.gob.ve/> (consulta del 14/03/2018).
 14. Lavoranti, O., A. Lins, H. Da Silva y C. Ferreira. 2004. Modelagem AMMI para estudos de interação em modelos estatísticos de efeitos fixos. Embrapa Florestas, Colombo, Paraná, Brasil. Comunicado Técnico 124, 7p. <http://www.cnpf.embrapa.br> (consulta del 13/03/2018).
 15. Oliveira R., R. Von Pinho, M. Balestre y D. Ferreira. 2010. Evaluation of maizes hybrids environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 10: 247-253.
 16. Ramalho, M., A. Abreu, J. dos Santos y J. Nunes. 2012. Aplicação da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil. 522 p.
 17. Ramos L., A. Sanches y J. Cotes. 2009. Testes multiambientais na seleção de genótipos de arroz utilizando o modelo de regressão nos sítios ou locais. *Ciência Rural*, Santa Maria 39(1): 52-57.
 18. Silva R. y G. Benin. 2012. Análises biplot: conceitos, interpretações e aplicações. *Ciência Rural*, Santa Maria 42(8): 1404-1412.
 19. Samonte, S., L. Wilson, A. McClung y J. Medley. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop Science* 45: 2414-2424.
 20. Yan, W. 2002. Singular-value partition for biplot analysis of multi-environment trial data. *Agronomy Journal* 94(5): 990-996.
 21. Yan, W. 2011. GGE Biplot vs. AMMI Graphs for Genotype-by-Environment data analysis. *Journal of the India Society of Agricultural Statistics* 65(2): 181-193.

22. Yan, W. y I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci.* 42: 11-20.
23. Yan, W. y J. Holland. 2010. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171(3): 355-369.
24. Yan, W. y M. Kang. 2003. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
25. Yan, W., L. Hunt, Q. Sheng y Z. Szlavnics. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40(3): 597-605.