

# Interacción genotipo x ambiente en *Elaeis guineensis* e Híbridos OxG de palma de aceite en Colombia

## Genotype x environment interaction in *Elaeis guineensis* and OxG Hybrids of oil palm in Colombia

Sandra Liliana Castañeda-Garzón <sup>1,2</sup>, Jorge Humberto Argüelles Cárdenas <sup>1,3</sup>, David Ricardo Hernández <sup>1,4</sup>, Olga María Castro Navarro <sup>1,5</sup>.

<sup>1</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. <sup>2</sup>✉ [slcastaneda@agrosavia.co](mailto:slcastaneda@agrosavia.co)

<sup>3</sup>✉ [jarguelles@agrosavia.co](mailto:jarguelles@agrosavia.co), <sup>4</sup>✉ [drhernandez@agrosavia.co](mailto:drhernandez@agrosavia.co), <sup>5</sup>✉ [omcastro@agrosavia.co](mailto:omcastro@agrosavia.co)



<https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.91874>

2021 | 70-2 p 189-197 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 26-11-2020. Acep.: 13-10-2021

### Resumen

En Colombia, las zonas palmeras presentan condiciones climáticas diferentes que inciden en el desarrollo y en el rendimiento del cultivo. La producción de siete genotipos Ténera (DxP) y de nueve genotipos del híbrido OxG de palma de aceite, se evaluó entre 2015 y 2017 en dos zonas palmeras del país, bajo un diseño en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y 20 palmas por unidad experimental. Se realizó análisis combinado de covarianza para los genotipos Ténera y OxG, considerando como covariable el número de palmas por unidad experimental, para establecer el efecto de los genotipos y del ambiente en el rendimiento (kg/parcela) de fruta fresca (RFF). El ambiente y los genotipos se clasificaron mediante análisis de conglomerados y el análisis de estabilidad del rendimiento se estimó por medio del modelo AMMI. En híbridos OxG se observaron diferencias significativas ( $\alpha < 0.0001$ ) en RFF entre ambientes, entre genotipos y en la interacción genotipo x ambiente (GxA), mientras que en los materiales Ténera las diferencias ( $\alpha < 0.0001$ ) se presentaron entre ambientes y en la interacción GxA. Se identificó adaptación específica en Ténera T6, T1 y H14 a los ambientes Tu2017B, Li2016A y Li2017A. Se observó adaptación general en Ténera T2 y T3 e híbridos OxG H11 y H15. El rendimiento de racimos de los genotipos T2 y T3 fue 176.2 y 174.1 kg/parcela, mientras que en H15 y H11 fue 274.2 y 264.6 kg/parcela. En genotipos Ténera e híbridos OxG, el rendimiento de RFF fue influenciado por la interacción GxA.

**Palabras claves:** AMMI, *Elaeis oleifera*, *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*, producción.

### Abstract

In Colombia, the oil palm growing-regions have different climatic conditions that influence the development and the crop yield. The crop production of seven tenera genotypes and nine OxG hybrids of oil palm (F1 and backcross) was evaluated between 2015 and 2017 in two oil palm areas, in a complete randomized block design with four replications and 20 palms per experimental unity. Combined analyzes of covariance were initially performed for tenera and OxG hybrid genotypes, considering the number of palms per experimental unit as a covariate, in order to establish the effect of genotypes (G) and the environment (E) in yield (kg/plot). The environments and genotypes were classified using cluster analysis and yield stability analysis was made using AMMI model. In OxG hybrids, differences ( $\alpha < 0.0001$ ) were observed in fresh fruit bunches (kg/plot) between environments, between genotypes and genotype x environment (GxE) interaction for yield (kg/plot), while differences ( $\alpha < 0.0001$ ) in tenera materials were found between environments and in GxE interaction. Specific adaptation was identified in tenera T6, T1, and H14 in the environments Tu2017B, Li2016A, and Li2017A. General adaptation was observed in tenera T2 and T3, and OxG hybrids H11 and H15. Yield genotypes of T2 and T3 were 176.2 and 174.1 kg/plot, while H15 and H11 was 274.2 and 264.6 kg/plot. In tenera genotypes and OxG hybrids, the RFF yield was influenced by the GxA interaction.

**Keywords:** AMMI, *Elaeis oleifera*, *Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*, production.

## Introducción

La palma de aceite se cultiva debido a la producción de aceite (mesocarpio y almendra) contenido en los racimos de fruta fresca (RFF) (Corley y Tinker, 2015). El rendimiento de RFF lo determina el número de racimos y el peso promedio del racimo (Okoye *et al.*, 2008), caracteres influenciados por factores genéticos y ambientales (Corley y Tinker, 2015; Okoye *et al.*, 2008).

La interacción genotipo x ambiente (GxA) es una fuente de variación importante, porque según su magnitud, puede reducir la tasa de progreso de selección y también el uso de cultivares en áreas específicas (Kang y Gauch, 1996). Su análisis es útil para determinar “la expresión genotípica diferencial a través de los ambientes” (Fox *et al.*, 1997), partiendo del conocimiento del efecto ambiental en la adaptación y el comportamiento varietal (Vallejo y Estrada, 2002). La interacción GxA es evaluada mediante diferentes metodologías, entre ellas: análisis de regresión conjunta (Eberhart y Russell, 1966), componentes de varianza (Shukla, 1972), método de efectos aditivos principales e interacciones multiplicativas (AMMI) (Gauch, 2006), modelo de regresión de sitios (SREG) (Crossa y Cornelius, 1997; Crossa *et al.*, 2002) y GGE Biplot Analysis (Yan y Tinker, 2006). En *Elaeis guineensis* Jacq. la interacción GxA ha sido evaluada en el rendimiento y sus componentes (Obisesan y Fantula, 1983; Rosenquist, 1981; Rafii *et al.*, 2001; 2012; 2013; Okoye *et al.*, 2008), así como en la producción de materia seca en diferentes entornos con déficit de humedad (Ubara *et al.*, 2017).

El objetivo del estudio fue estimar la interacción GxA a través del modelo AMMI, con respecto al rendimiento de RFF (kg/parcela) de siete genotipos Ténera y nueve del híbrido OxG de palma de aceite, evaluados durante tres años, en tres localidades de dos zonas palmeras de Colombia. Se evaluaron genotipos de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y materiales comercialmente disponibles, entre el segundo y cuarto año de su etapa productiva. Esto, en el marco del producto 384 “Caracterización de siete materiales Ténera y nueve híbridos con adaptación específica determinada”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR).

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en tres localidades colombianas: 1) Plantación Palmas de Tumaco-Zona palmera occidental, Tumaco, Nariño, 2) Centro de Investigación La Libertad-Zona palmera oriental, Villavicencio, Meta y 3) Centro de Investigación Carimagua-Zona palmera oriental, Puerto Gaitán, Meta (Tabla 1). Por localidad se evaluaron siete genotipos Ténera (T1, T2, T3, T6, T7 T8 y T9) y nueve híbridos interespecíficos (H4, H5, H10, H11, H12, H13, H14, H15 y H16). Los genotipos Ténera corresponden a cruzamientos Dura (D) x Pisífera (P) de la especie *Elaeis guineensis* (G), mientras que los híbridos fueron obtenidos por cruzamiento entre palmas de las especies *Elaeis oleifera* (O) y *Elaeis guineensis* (G) en diferentes tipos: cruzamientos OxG para los híbridos H4, H5, H11, H12, H13, H14 y H15, retrocruzamiento (OxG)xG para el híbrido H16 y retrocruzamiento (GxO)xG para el híbrido H10.

Los genotipos se sembraron en septiembre y octubre de 2010 (La Libertad y Carimagua) y enero de 2011 (Tumaco), en dos ensayos independientes, Ténera e híbridos. Se empleó una distancia de siembra en triángulo de nueve y diez metros entre palma y palma, para una densidad de 143 y 115 palmas/ha (Ténera y OxG). En cada experimento se utilizó un arreglo de bloques completos al azar con cuatro repeticiones de 20 palmas cada una (cuatro hileras de cinco plantas por material). La producción (kg/parcela) se estimó con base en los registros de cosecha por palma, tomados de la unidad experimental (seis palmas centrales), en ciclos de 15 y 20 días en promedio (Ténera y OxG). Durante el periodo 2015 a 2017 se contabilizó el número de racimos y su peso. La variable ambiente se definió como la combinación de localidades, años y semestres. Localidades: La Libertad (Li), Carimagua (Ca) y Tumaco (Tu). Años, 2015, 2016 y 2017. Semestres: A y B. Los ambientes Tu2015A, Tu2015B, Tu2016A, Tu2016B y Ca2015A, se excluyeron del análisis por falta de datos y/o datos incompletos.

Debido a diferencias en el número de palmas productivas por unidad experimental (UE) entre genotipos, se realizó un análisis combinado de covarianza por ambiente, para la variable rendimiento de RFF (kg/parcela), considerando el número de palmas como covariable; a través del procedimiento GLM de SAS (v9.4). La comparación de medias

Tabla 1. Valores medios anuales de las variables climáticas (2010 a 2017)

Localidad	Ubicación geográfica	Elevación (m s.n.m.)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Brillo solar (Horas/día)
Carimagua	4°34'40" N 71°20'49" W	170	2705	26.36	82.31	5.08
La Libertad	4°05'19" N 73°27'16" W	316	2849	26.37	79.38	5.35
Tumaco	1°29'50" N 78°44'34" W	24	3188	26.59	85.72	2.67

entre los genotipos se hizo mediante la prueba de Tukey (P=005). Estos análisis se realizaron independientemente para cada tipo de material genético. En los genotipos Ténera, el número de palmas productivas fue seriamente disminuido por la enfermedad pudrición del cogollo (PC) y por algunas palmas en ciclo masculino; mientras que, en los híbridos OxG fue debido a la cantidad de palmas en ciclo masculino, más que a la enfermedad.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_j + B_{k(j)} + G_i + (GA)_{ij} + No\_palmas + e_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Rendimiento medio de fruto por palma para cada unidad experimental del i-ésimo genotipo obtenido en el j-ésimo ambiente y el k-ésimo bloque

$\mu$  = Efecto de la media general

$A_j$  = Efecto del j-ésimo ambiente

$B_{k(j)}$  = Efecto del k-ésimo bloque o repetición dentro de cada ambiente

$G_i$  = Efecto del i-ésimo genotipo

$(GA)_{ij}$  = Efecto de la interacción entre el i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente

No\_palmas = Número de palmas vivas por unidad experimental (Covariable)

$e_{ijk}$  = Efecto aleatorio del error experimental asociado al i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente y el K-ésimo bloque, según el modelo lineal aditivo.

Con base en las medias ajustadas por el número de palmas por UE mediante el análisis de covarianza (ANCOVA), se realizó un agrupamiento de ambientes y de genotipos, para Ténera e híbridos OxG, utilizando el análisis de conglomerados, mediante el procedimiento CLUSTER y el algoritmo de Ward en SAS v9.4. Este procedimiento agrupa jerárquicamente las observaciones (genotipos y ambientes) de un conjunto de datos. El método de varianza mínima de Ward minimiza la varianza dentro de cada grupo y la

maximiza entre grupos (Statistical Analysis System [SAS], 2012).

La interacción GxA se descompuso con base en el modelo AMMI (Gabriel, 1971; Crossa *et al.*, 1990; Crossa *et al.*, 2000):

Donde:

$Y_{ij}$  = Rendimiento observado del genotipo i-ésimo, en el ambiente j-ésimo, en el bloque k-ésimo

$\mu$  = Media general

$G_i$  = Desviación del genotipo i-ésimo de la media general

$A_j$  = Desviación del ambiente j-ésimo de la media general

$\lambda_n$  = Valor singular para el eje n-ésimo del CP de la interacción

$\gamma_{in}$  = Vector característico del genotipo i-esimo para el eje n-ésimo

$\delta_{jn}$  = Vector característico del genotipo j-esimo para el eje n-ésimo

$\rho_{ij}$  = Parte de la interacción que no es explicada por el ACP

$\epsilon_{ijk}$  = Desviación del genotipo i-ésimo, en el ambiente j-ésimo de la repetición k-ésima

Cornelius y Seyedsadr (1997), lo definen como modelos lineales-bilineales generales, porque tienen términos aditivos (lineales) y términos multiplicativos (bilineales). Los resultados AMMI se resumen en una gráfica de dos dimensiones (biplot), donde se ubican los efectos principales de los ambientes y los genotipos, y los efectos de la interacción GxA.

## Resultados

**Genotipos Ténera.** El ANCOVA indicó un efecto significativo del número de palmas productivas (en ciclo productivo) por UE, sobre el rendimiento de RFF (kg/parcela). Se detectaron diferencias significativas entre los ambientes ( $\alpha < 0.0001$ ), no se presentaron diferencias significativas entre los genotipos, pero hubo efecto significativo de la interacción GxA ( $\alpha < 0.0001$ ). El ambiente explicó el

Tabla 2. ANCOVA por ambiente (genotipos Ténera)

F.V.	G.L.	S.C.	% de variabilidad	C.M.	F	Pr > F
Ambientes	12	1515280.42	33.1	126273.36	16.3	< 0.0001
Bloques (Ambientes)	39	302178.70	6.6	7748.17	1.45	
Genotipos	6	52415.62	1.1	8735.94	1.64	0.1372
Ambientes* Genotipos	72	792958.89	17.3	11013.32	2.07	< 0.0001
Número plantas	1	131972.51	2.9	131972.51	24.77	< 0.0001
Error	228	1214817.04		5328.14		
Total	358	4573895.11				
C.V. (%)	45.9					

F.V.: Fuente de variación; G.L.: grados de libertad; S.C.: suma de cuadrados; C.M.: cuadrados medios; F: F calculado; Pr > F es la significancia.

33.1 % de la variabilidad total, los genotipos el 1.1 % y la interacción GxA el 17.3 % (Tabla 2). Las Figuras 1 y 2 representan el agrupamiento de los genotipos y de los ambientes.

Los genotipos Ténera se clasificaron en cuatro conglomerados, al primero lo conforman T1 y T7, presentando el rendimiento medio más bajo (144.8 kg/parcela). Los genotipos T6 y T9 (152.1 kg/parcela) constituyen el segundo grupo, mientras que T2 y T3 el tercer grupo, con mayor rendimiento medio de RFF (175.1 kg/parcela). El genotipo T8 representa el cuarto grupo (164.6 kg/parcela) (Tabla 3).

La clasificación general de los ambientes para genotipos Ténera, revela cuatro conglomerados, el primero lo conforman los ambientes Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B, Tu2017A y Tu2017B con un rendimiento medio de 89.3 kg/parcela. Los ambientes Ca2017A, Ca2017B y Li2016A (149.3 kg/parcela) constituyen el segundo grupo y al tercero lo conforman Li2015A, Li2015B, Li2017A y Li2017B (220.5 kg/parcela). El cuarto grupo lo representa Li2016B (282.5 kg/parcela), con mayor rendimiento

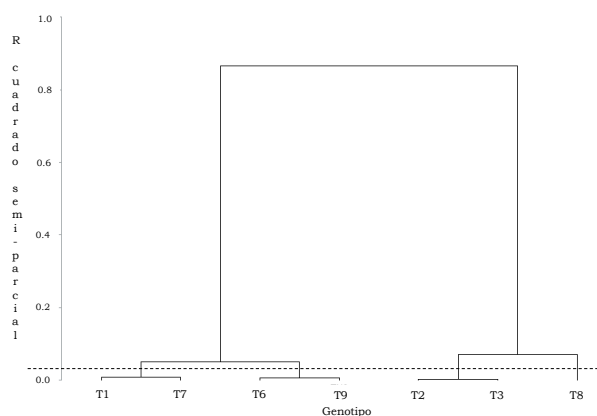


Figura 1. Dendrograma para genotipos Ténera según el rendimiento de RFF.

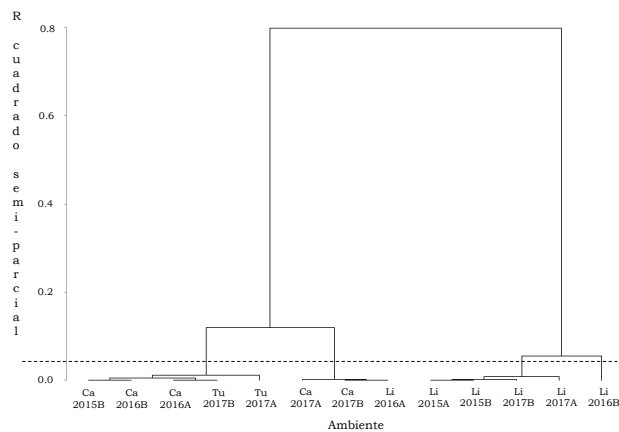


Figura 2. Dendrograma para los ambientes evaluados en genotipos Ténera según el rendimiento de RFF.

medio (Tabla 4). De acuerdo con la prueba de Gollob (1968), para los genotipos Ténera evaluados, el primer componente representó el 47.8 % de la varianza total y el segundo el 23.7 %, para un acumulado del 71.5 % en los dos primeros términos AMMI (Tabla 5).

Los genotipos T1, T3 y T9 presentaron mayor contribución a la interacción GxA, con rendimientos medios de 146.8, 176.2 y 153.8 kg/parcela. T3 exhibe el mayor valor con 158.4 kg/parcela y T7 presentó bajo rendimiento (142.8 kg/parcela) (Figura 3 y Tabla 6). Los ambientes Li2016A, Li2016B, Li2017A, Li2017B, Ca2017A, Ca2017B y Tu2017B, fueron los que más contribuyeron en esta interacción, siendo Li2016B, el de mayor rendimiento medio (282.6 kg/parcela).

En la Figura 3 se identifican tres sectores delimitados por las líneas punteadas, en el primer sector se ubican los ambientes Li2015B, Li2017A, Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B y Ca2017A, la mayoría correspondientes a Carimagua, cuyos rendimientos medios son inferiores a la media general, en cuanto ambientes se refiere. El genotipo T9 (153.8 kg/parcela) fue el que mejor se adaptó en dichos ambientes, especialmente en Li2017A. En el segundo sector se ubican los ambientes Tu2017A, Tu2017B y Li2016A. En Li2016B y Li2017B se presentaron altos valores de rendimiento de RFF (282.6 y 220.2 kg/parcela); el genotipo T3 (176.2 kg/parcela) fue el de mejor adaptación.

Tabla 3. Estadísticas básicas de grupos correspondientes a genotipos Ténera (valores en kg/parcela)

Grupo	Genotipos	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación
1	T1, T7	144.8	142.8	146.8	1.94
2	T6, T9	152.1	150.5	153.8	1.52
3	T2, T3	175.1	174.1	176.2	0.84
4	T8	164.6	164.6	164.6	

Tabla 4. Estadísticas básicas de los ambientes evaluados para los genotipos Ténera (valores en kg/parcela)

Grupo	Ambientes	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación
1	Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B, Tu2017A, Tu2017B	89.3	66.9	103.4	16.8
2	Ca2017A, Ca2017B, Li2016A	149.3	140.4	154.1	5.2
3	Li2015A, Li2015B, Li2017A, Li2017B	220.5	203.2	231.8	5.7
4	Li2016B	282.6	282.6	282.6	

ANÁLISIS GENOTIPO X AMBIENTE GENOTIPOS DE PALMA DE ACEITE - TIPO MATERIAL: TENERAS

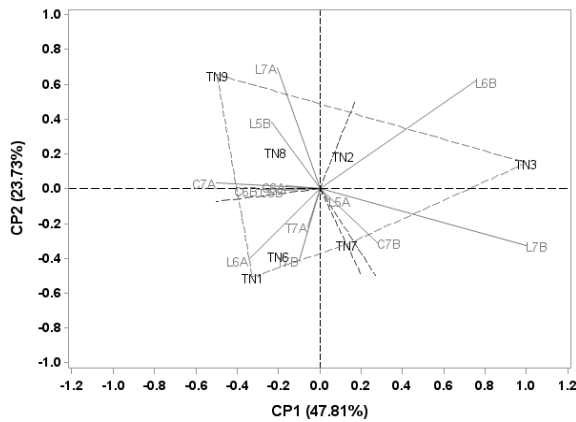


Figura 3. Diagrama de la interacción GxA de acuerdo con el modelo AMMI (genotipos Ténera).

**Híbridos interespecíficos OxG.** El ANCOVA reveló un efecto significativo del número de plantas productivas por UE. Entre ambientes, entre genotipos y en la interacción GxA se detectaron diferencias significativas ( $\alpha < 0.0001$ ). El ambiente explicó el 35.5 %, de la variabilidad total, los genotipos el 7.0 % y la interacción el 13.6 % (Tabla 7). La Figura 4 y la Figura 5 representan el agrupamiento de los genotipos y de los ambientes.

Los genotipos OxG se congregaron en tres grupos: el primero, conformado por H10 y H16, presentó el menor rendimiento medio (129.1 kg/parcela), mientras el segundo grupo, constituido por H11 y

H15 el mayor rendimiento medio (269.4 kg/parcela). Los híbridos H4, H5, H12, H13 y H14 integran el tercer grupo, con 209.3 kg/parcela de RFF (Tabla 8).

En la clasificación general de los ambientes para genotipos OxG se conformaron tres grupos: el primero constituido por los ambientes Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B y Tu2017A, con un rendimiento medio de 99.7 kg/parcela, el valor más bajo. El grupo dos conformado por Ca2017A, Ca2017B, Li2015A, Li2016A y Tu2017B (163.9 kg/parcela) y el grupo tres por Li2015B, Li2016B, Li2017A y Li2017B (361.2 kg/parcela), que fue el de mayor rendimiento medio (Tabla 9). De acuerdo con la prueba de Gollob (1968), para los híbridos OxG evaluados, el primer componente representó el 45.2 % de la varianza total y el segundo el 32.9 %, para un acumulado del 78.2 % de los dos primeros términos AMMI (Tabla 10).

Los híbridos H5, H10, H11, H13, H14, H15 y H16, presentaron la mayor contribución a la interacción GxA; H11 (264.6 kg/parcela), H13 (208.3 kg/parcela), H14 (229.7 kg/parcela) y H15 (274.2 kg/parcela), presentaron los mayores rendimientos medios (Figura 6 y Tabla 11). Los ambientes Li2015B, Li2016A y Li2017A, fueron los que más contribuyeron con esta interacción. En la Figura 6 se identifican tres sectores delimitados por las líneas punteadas, en el primero se ubican los ambientes Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B, Ca2017B, Li2016A y Tu2017A; en este sector, los híbridos H10 y H16 presentaron los menores rendimientos medios (128.2 y 130.1 kg/parcela). En el segundo sector se ubicó Li2017A, en el cual, H14 presentó el mayor rendimiento medio (229.7 kg/

Tabla 5. Sumas de cuadrados y cuadrados medios para los términos AMMI (Prueba de Gollob)

S.C.	%	% (acumulado)	G.L.	C.M.	F	Pr > F
389457.40	47.81	47.81	17	22909.26	3.76	0.00000
193292.22	23.73	71.54	15	12886.15	2.11	0.00946
114140.23	14.01	85.55	13	8780.02	1.44	0.14013
53185.74	6.53	92.08	11	4835.07	0.79	0.64736
45416.58	5.57	97.65	9	5046.29	0.83	0.59134
19101.63	2.34	100.00	7	2728.80	0.45	0.87160

F.V.: Fuente de variación; G.L.: grados de libertad; S.C.: suma de cuadrados; C.M.: cuadrados medios; F: F calculado; Pr > F es la significancia.

Tabla 6. Medias ajustadas del rendimiento de RFF, para cada ambiente y para cada genotipo Ténera

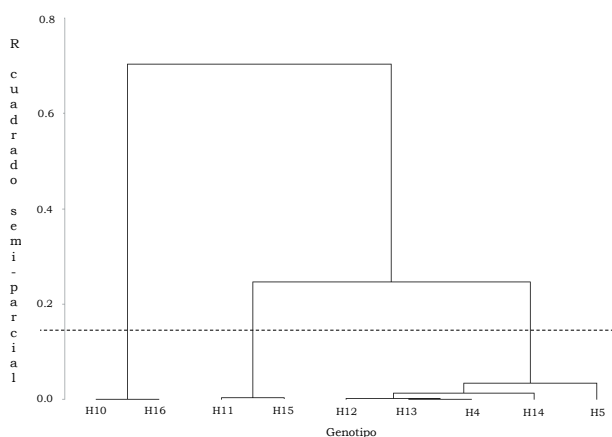
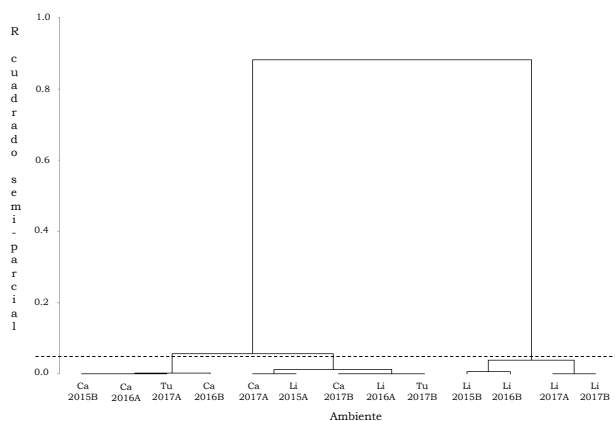
GENOTIPOS	Ambientes												Medias	
	Ca 2015B	Ca 2016A	Ca 2016B	Ca 2017A	Ca 2017B	Li 2015A	Li 2015B	Li 2016A	Li 2016B	Li 2017A	Li 2017B	Tu 2017A		Tu 2017B
T1	93.4	121	87.1	194.8	123.4	195.4	164.1	209.3	202.2	125.2	187.4	81.9	122.9	146.8
T2	80.2	142.7	86.6	223.4	119.6	246.9	283.1	105	316.1	203	291.3	57.1	108.3	174.1
T3	78.2	89.6	45.6	59.6	211.7	265.6	191.5	128.6	461.7	210.3	383	77.3	87.8	176.2
T6	65.8	75.5	68.6	102.2	164.7	300.5	205	210.2	206	176.9	173.1	79.6	128.3	150.5
T7	104.5	83.2	91.4	83.3	210	186.9	189.7	112.9	236.4	151.7	232.5	55.5	118.5	142.8
T8	95.1	95.4	94.7	163.8	139.6	195.9	312.7	166.1	247.4	256.9	218.1	67.9	86.2	164.6
T9	113.7	116.6	111.1	155.7	109.4	231.6	242.3	142.2	308.4	298.2	56.4	48.9	64.2	153.8
Medias	90.1	103.4	83.6	140.4	154.1	231.8	226.9	153.5	282.6	203.2	220.2	66.9	102.3	158.4



**Tabla 7.** ANCOVA por ambiente (genotipos OxG)

F.V.	G.L.	S.C.	%	C.M.	F	Pr > F
Ambientes	12	4733768.33	35.5	394480.69	59.47	<0.0001
Bloques (Ambientes)	39	258714.63	1.9	6633.71	1.09	
Genotipos	8	928522.17	7.0	116065.27	19.03	<0.0001
Ambientes* Genotipos	96	1809874.49	13.6	18852.86	3.09	<0.0001
Número plantas	1	278577.96	2.1	278577.96	45.67	<0.0001
Error	296	1805377.80		6099.25		
Total	452	13337672.24				
C.V. (%)	37.5					

F.V.: Fuente de variación; G.L.: grados de libertad; S.C.: suma de cuadrados; C.M.: cuadrados medios; F: F calculado, Pr > F es la significancia.

**Figura 4.** Dendrograma para genotipos OxG según el rendimiento de RFF.**Figura 5.** Dendrograma para los ambientes evaluados en genotipos OxG, según el rendimiento de RFF.

parcela), demostrando buena adaptación. En el tercer sector, quedaron incluidos Li2015A, Li2015B, Li2016B, Li2017B, Ca2017A y Tu2017B. El híbrido H11 fue el de mejor adaptación en Li2017B, Li2015B y Li2016B por su mayor rendimiento, mientras que el híbrido H15 se adaptó mejor en Li2017B, con el segundo rendimiento más alto.

Entre los años 2015 y 2017, los híbridos H10, H11, H15 y H16 presentaron rendimientos variables. El híbrido H16 (retrocruzamiento) presentó los menores valores de rendimiento en las tres localidades. El híbrido H11 (F1) se destaca en La Libertad y el híbrido H15 (F1) lo es en Carimagua y Tumaco. En la Orinoquía, los mayores rendimientos (kg/parcela) para los híbridos OxG se obtuvieron en los ambientes Li2015B, Li2016A, Li2016B, Li2017A y Li2017B.

## Discusión

Durante la investigación los genotipos Ténera e híbridos OxG presentaron comportamiento variable en cuanto a rendimiento de RFF (kg/parcela), debido a la interacción GxA ( $\alpha < 0.0001$ ) de tipo cualitativo; al respecto, Vallejo y Estrada (2002) aseguran que una interacción cualitativa genera cambios en el mérito de los genotipos en los diferentes ambientes. En híbridos OxG se observaron diferencias significativas ( $\alpha < 0.0001$ ) en ambientes, genotipos y en la interacción GxA para la variable rendimiento (kg/parcela), mientras que en materiales Ténera las diferencias significativas ( $\alpha < 0.0001$ ) se presentaron en ambientes y en la interacción GxA.

Estos resultados confirman los hallazgos en otras investigaciones, por ejemplo, Rafii *et al.* (2001; 2012) reportaron diferencias significativas en genotipos y ambientes para las variables rendimiento de aceite y sus componentes, en 40 y 38 progenies DxP, evaluadas en seis y cuatro localidades de Malasia. Okoye *et al.*, (2008) obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0,001$ ) en el genotipo y el periodo de evaluación, para las variables rendimiento de RFF, número de racimos y peso promedio del racimo, en 15 genotipos (Deli x Ténera) evaluados en Nigeria durante 1999-2002. Bueraheng *et al.*, (2018) observaron que las varianzas atribuidas al ambiente, el genotipo y a la interacción GxA, fueron significativas ( $p < 0,001$ ) para seis progenies *E. guineensis* Ténera evaluadas en varias localidades del sur de Tailandia, con respecto a la estabilidad del rendimiento de aceite y sus componentes. Según los autores, el rendimiento de cada progenie evaluada depende del ambiente específico en el cual se establece.

Los genotipos Ténera e híbridos OxG presentaron variación en el rendimiento en algunos ambientes con respecto al periodo de registro, atribuible a las diferencias climáticas durante los procesos fisiológicos de formación de inflorescencias. Los ciclos de floración, masculinos o femeninos, obedecen a la influencia de factores externos como: temperatura, luminosidad, estado nutricional, precipitación y genotipo (Corley y Tinker, 2015; Bastidas *et al.*, 2013).

Según Romero *et al.*, (2007) el rendimiento de palma de aceite está determinado por la radiación solar fotosintéticamente activa, la fracción de esta interceptada por el dosel, la eficiencia fotosintética del cultivo, el índice de cosecha y la interacción entre la temperatura durante el periodo de crecimiento y la disponibilidad de agua

**Tabla 8.** Estadísticas básicas de los grupos correspondientes a los genotipos OxG (valores en kg/parcela)

Grupo	Genotipos	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación
1	H10, H16	129.1	128.2	130.1	1.1
2	H11, H15	269.4	264.6	274.2	2.5
3	H4, H5, H12, H13, H14	209.3	185.8	229.7	7.6

**Tabla 9.** Estadísticas básicas de los grupos de ambientes evaluados para los genotipos OxG (valores en kg/parcela)

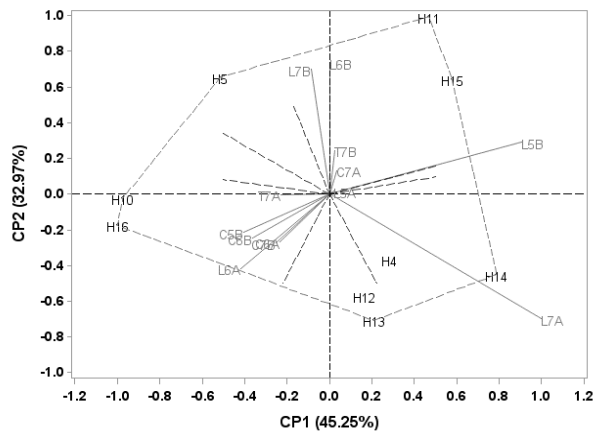
Grupo	Ambientes	Media	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación
1	Ca2015B, Ca2016A, Ca2016B, Tu2017A	99.7	86.2	110.5	10.3
2	Ca2017A, Ca2017B, Li2015A, Li2016A, Tu2017B	163.9	142.8	190.3	14.1
3	Li2015B, Li2016B, Li2017A, Li2017B	361.2	298.8	403.6	13.7

**Tabla 10.** Sumas de cuadrados y cuadrados medios para los términos AMMI (Prueba de Gollob)

S.C.	%	% (acumulado)	G.L.	C.M.	F	Pr > F
868989.08	45.25	45.25	19	45736.27	749.87	0
633147.77	32.97	78.21	17	37243.99	610.63	0
207902.12	10.82	89.04	15	13860.14	227.24	0.00475
110339.7	5.74	94.78	13	8487.67	139.16	0.16202
47270.51	2.46	97.24	11	4297.32	0.70	0.73409
31611.29	1.64	98.89	9	3512.37	0.57	0.81668
17162.21	0.89	99.78	7	2451.74	0.40	0.90078
4137.29	0.22	100	5	827.46	0.13	0.984

F.V.: Fuente de variación; G.L.: grados de libertad; S.C.: suma de cuadrados; C.M.: cuadrados medios; F: F calculado; Pr > F es la significancia.

ANÁLISIS GENOTIPO X AMBIENTE GENOTIPOS DE PALMA DE ACEITE - TIPO MATERIAL: HÍBRIDOS



**Figura 6.** Diagrama de la interacción GxA de acuerdo con el modelo AMMI (Híbridos OxG).

(precipitación o riego). Al respecto, el comportamiento diferencial de los genotipos Ténera e híbridos OxG en el rendimiento de RFF, obedece a la variación presentada en precipitación, temperatura y brillo solar, entre las localidades Carimagua, La Libertad y Tumaco, durante el periodo de estudio (2015-2017). Según Bastidas et al., (2013), la producción de fruto en los híbridos OxG

depende en mayor proporción de los factores ambientales (clima, suelo, nutrientes, plagas, enfermedades, manejo agronómico, riego, drenajes, etc.) y en menor proporción del genotipo.

## Conclusiones

En genotipos Ténera e híbridos OxG el rendimiento de RFF fue alterado por la interacción GxA, la cual contribuyó con el 17.3 de la variabilidad de los genotipos y con el 13.6 % en híbridos OxG. En contraste, al ambiente se le atribuye el 33.1 % de la variabilidad de los genotipos Ténera y el 35.5 % en los híbridos OxG.

La variabilidad en cuanto a la producción de RFF fue mayor en los genotipos Ténera, puesto que los siete genotipos Ténera conformaron cuatro grupos diferentes, mientras que los nueve genotipos del híbrido OxG se agruparon en tres conglomerados.

El análisis de interacción GxA por el método AMMI denota que los genotipos Ténera T6 y T1 presentaron adaptación específica en los ambientes Tu2017B y Li2016A. Se destacan los genotipos T2 y T3 e híbridos OxG H11 y H15 por los mayores rendimientos de RFF (kg/parcela) en los ambientes evaluados.

**Tabla 11.** Medias ajustadas del rendimiento de RFF para cada ambiente y para cada genotipo Híbrido OxG

GENOTIPOS	Ambientes												Medias	
	Ca 2015B	Ca 2016A	Ca 2016B	Ca 2017A	Ca 2017B	Li 2015A	Li 2015B	Li 2016A	Li 2016B	Li 2017A	Li 2017B	Tu 2017A		Tu 2017B
H4	76.2	134.7	108.3	129.3	90.5	253.8	453.3	191.9	229.9	426	320.2	149.6	144.5	208.3
H5	62.6	76.1	30.3	109.9	155	151.8	281.2	126.4	344	227.9	469.4	159.4	220.8	185.8
H10	87	49.1	68.7	150.8	116	119.2	123	125	200.2	166.8	344.5	50.7	65	128.2
H11	109.8	82.3	75.6	228.5	141.2	311.4	538.1	129.1	467.2	411.3	580.7	144.1	220.1	264.6
H12	125.8	128.9	127	199.4	146.9	173.5	313.6	162.2	263.5	529.2	364	116.3	138.7	214.5
H13	125.8	137.4	56	190	172.7	202.1	337.4	180.1	194.2	514.5	348.7	117.4	131.9	208.3
H14	75.6	87.4	80.2	178	236	196.7	448.9	141	290.4	607.4	373.4	81.3	189.9	229.7
H15	120.3	155.8	125.1	385	126.6	200.7	488.1	90.1	460.7	507.4	521.6	134.6	248.3	274.2
H16	106.3	78.4	104.4	106.7	108.9	103.8	117.7	139.1	239.2	191	309.6	41.2	45	130.1
Medias	98.8	103.3	86.2	186.4	143.7	190.3	344.6	142.8	298.8	397.9	403.6	110.5	156	204.9

## Agradecimientos

A AGROSAVIA, al MADR y Palmas de Tumaco S.A.S. Especialmente a S. Bastidas, R. Reyes, C. Castilla, W. Tolosa, M. Arizala, D. Angulo, M. Villalobos, A. Muñoz, O. Triana.

## Referencias

- Bastidas, S., Peña, E. y Reyes, R. (2013). *Preguntas sobre palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq., palma Noli *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés y los híbridos interespecíficos Noli x Palma de aceite (*E. oleifera* x *E. guineensis*)*. (1.ª ed.). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12614>
- Bueraheng, N., Sdoodee, S., Anothai, J. y Eksomtramage, T. (2018). Stability of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) progenies on yield and yield components across environments using AMMI analysis. *Australian Journal of Crop Science*, 12(8), 1259-1264. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.08.PNE964>
- Corley, R.H.V. y Tinker, P.B.H. (2015). *The Oil Palm*. (5.ª ed.). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118953297>
- Cornelius, P. y Seyedsadr, M. (1997). Estimation of general linear-bilinear models for two-way tables. *Journal of statistical computation and simulation*. 58(4), 287-322. <https://doi.org/10.1080/00949659708811837>
- Crossa, J., Gauch, H.G. y Zobel, R.W. (1990). Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis of Two International Maize Cultivar Trials. *Crop Science*, 30(3), 493-500. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183x003000030003x>
- Crossa, J. y 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. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020017x>
- Crossa, J., Cornelius, P. y Vargas, M. (2000). *Modelos estadísticos multiplicativos para el análisis de la interacción genotipo x ambiente*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).
- Crossa, J., Cornelius, P.L. y Yan, W. (2002). Biplots of Linear-Bilinear Models for Studying Crossover Genotype x Environment Interaction. *Crop Science*, 42(2), 619-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.0619>
- Eberhart, S.A. y Russell, W.A. (1966). Stability Parameters for Comparing Varieties 1. *Crop Science*, 6(1), 36-40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183x000600010011x>
- Fox, X.P., Crossa, J. y Romagosa, I. (1997). Multi-environment testing and genotype x environment interaction. En R.A. Kempton, P.N. Fox y M. Cerezo (Eds.), *Statistical Methods for Plant Variety Evaluation* (pp. 117-137). Chapman y Hall. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1503-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1503-9_8)
- Gabriel, K.R. (1971). The Biplot Graphic Display of Matrices with Application to Principal Component Analysis. *Biometrika*, 58(3), 453-467. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.453>
- Gauch, H.G. (2006). Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE. *Crop Science*, 46(4). <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193>
- Gollob, H.F. (1968). A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika*, 33(1), 73-115. <https://doi.org/10.1007/BF02289676>
- Kang M.S. y Gauch H.G. (1996). *Genotype by-environment interaction*. CRC Press.
- Obisesan, I.O. y Fatunla, T. (1983). Genotype X environment interaction for bunch yield and its components in the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Theoretical and Applied Genetics*, 64(2), 133-136. <https://doi.org/10.1007/BF00272720>
- Okoye, M.N., Okwuagwu, C.O. y Uguru, M. (2008). Genotype and genotype by environment (GGE) biplot analysis of fresh fruit



- bunch yield and yield components of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Applied Biosciences*, 8(1), 288-303.
- Rafii, M.Y., Rajanaidu, N., Jalani, B.S. y Zakri, A.H. (2001). Genotype x Environment Interaction and Stability Analysis in Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Progenies Over Six Locations. *Journal of Oil Palm Research*, 13(1), 11-41.
- Rafii, M.Y., Jalani, B.S., Rajanaidu, N., Kushairi, A., Puteh, A. y Latif, M.A. (2012). Stability analysis of oil yield in oil palm (*Elaeis guineensis*) progenies in different environments. *Genetics and Molecular Research GMR*, 11(4), 3629-3641. <https://doi.org/10.4238/2012.October.4.10>
- Rafii, M.Y., Isa, Z.A., Kushairi, A., Saleh, G.B. y Latif, M.A. (2013). Variation in yield components and vegetative traits in Malaysian oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) dura × pisifera hybrids under various planting densities. *Industrial Crops and Products*, 46, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.054>
- Romero, H.M., Ayala, I. y Ruiz R.R. (2007). Ecofisiología de la palma de aceite [Número especial]. *Revista Palmas*, 28, 176-184. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1254>
- Rosenquist, E.A. (1981). *Performance of identical oil palm progenies in contrasting environments*. International Conference on the Oil Palm in Agriculture in the Eighties, Kuala Lumpur.
- Statistical Analysis System [SAS]. (2012). SAS STAT. User's Guide. Versión 9.4.
- Shukla, G.K. (1972). Some statistical aspects of partitioning genotype-environment components of variability. *Heredity*, 29(2), 237-245. <https://doi.org/10.1038/hdy.1972.87>
- Ubara, U.E., Agho, C.A., Aye, A.I., Yakubu, M., Eke, C.R. y Asemota, O. (2017). Identification of drought tolerant progenies in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences (IJARBS)*, 4(6), 120-127. <https://doi.org/10.22192/ijarbs.2017.04.06.018>
- Vallejo, F.A. y Estrada, E.I. (2002). *Mejoramiento genético de plantas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Yan, W., y Tinker, N.A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(3), 623-645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>