

Nuevas variedades de cacao seleccionadas en Colombia

Genaro Andrés Agudelo-Castañeda¹
Eduar Yovany Antolinez-Sandoval²
Eliana Yadira Báez-Daza¹
Yeirme Yaneth Jaimes-Suárez¹
Gladys Alejandra Romero-Guerrero^{1§}

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia. Centro de Investigación La Suiza. Bucaramanga, Colombia. CP. 250047. ²Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitatá, sede Cimpa, Barbosa, Colombia. CP. 250047.

§Autor para correspondencia: gromerog@unal.edu.co.

Resumen

El cultivo de cacao en Colombia ha venido creciendo en los últimos años y se consolida como un renglón de la economía agrícola del país. Cada vez más se requiere de desarrollos tecnológicos que contribuyan a mejorar la productividad y rentabilidad. Una de las causas del bajo rendimiento es la falta de genotipos y variedades productivas adaptadas y seleccionadas para las diferentes zonas con condiciones óptimas para el cultivo. El objetivo del presente estudio fue la evaluación agronómica de ocho genotipos de cacao TCS13, TCS19 (Theobroma Corpoica La Suiza), SCC53, SCC82, SCC83 (selección Colombia Corpoica) y CCS73, CCS77, CCS80 (colección Corpoica La Suiza), comparados frente a un testigo comercial ICS95 (imperial collage selection), en cuatro localidades productoras de las subregiones naturales Montaña Santandereana y Magdalena Medio en el nororiente colombiano, establecidos en sistemas agroforestales con maderas finas tropicales. Los resultados permitieron la identificación de dos genotipos superiores TCS13 y TCS19 por su rendimiento (producción de 1.5 y 1.8 kg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente), baja incidencia de enfermedades limitantes como moniliasis y autocompatibles. Estos resultados permitieron la inclusión de dos nuevas variedades en el registro nacional de cultivares comerciales ante el Instituto Colombiano Agropecuario en el año 2017.

Palabras clave: compatibilidad sexual, componentes de rendimiento, madera fina tropical.

Recibido: marzo de 2023

Aceptado: mayo de 2023

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao*) es un cultivo de productos básicos, originario de la región amazónica en América del Sur. Actualmente, su cultivo se extiende en la región tropical húmeda a nivel mundial, siendo África Occidental el mayor productor con 76%. En América del Sur, Colombia es el quinto mayor productor después de Brasil y Ecuador (ICCO, 2021), con una producción de 64 281 t de grano de cacao seco para el año 2019-2020. En la actualidad, en Colombia el cacao se cultiva en cuatro zonas agroecológicas correspondientes a Montaña Santandereana, bosque húmedo tropical, valles secos interandinos y la zona marginal baja cafetera (Quintana *et al.*, 2018).

En estas áreas existen condiciones diferenciales en altitud, clima, suelo y topografía (Meena *et al.*, 2019), ofreciendo estados de mayor y menor aptitud para el cultivo, demandando desarrollos tecnológicos y una oferta de variedades con adaptación general y específica. Montaña Santandereana es la zona agroecológica con mayor área de producción de cacao en Colombia. Está ubicado en los departamentos de Santander, Boyacá y Norte de Santander, en pisos térmicos cálidos y templados, su altitud varía entre 200 a 1 200 m, precipitación media anual entre 1 500 y 2 500 mm, irradiancia entre 1 800 y 2 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y temperatura promedio entre 25 y 30 °C (Agudelo *et al.*, 2018), es una región de topografía ondulada y la producción de cacao generalmente se establece en un sistema agroforestal.

La subregión Magdalena Medio es otra región de importancia para el cultivo del cacao, se localiza en los valles secos interandinos (Quintana *et al.*, 2018), caracterizada por precipitación anual entre 1 800 y 2 300 mm, temperatura promedio entre 23 y 28 °C, altitud entre 200 y 700 m sobre el nivel del mar, geográficamente está compuesta por un relieve ondulado con una topografía suave.

El cultivo del cacao tiene una larga tradición. Representa gran importancia para la sostenibilidad socioeconómica de la nación, así como para los medios de vida rurales, especialmente porque es un cultivo de economía campesina, con 65 000 familias productoras en 189 000 ha de cultivo, que genera 167 000 empleos directos e indirectos (García *et al.*, 2020). Actualmente, este es un cultivo clave para la sustitución de cultivos ilícitos en un contexto de posconflicto (Abbott *et al.*, 2018), y los esfuerzos se centran en aumentar la productividad y la competitividad.

A pesar de ser un cultivo en expansión, el cacao tiene bajos rendimientos en relación con el potencial productivo debido a diversos factores, incluyendo condiciones agroclimáticas, envejecimiento de la plantación, falta de variedades de alto rendimiento, mayor presión de enfermedades y plagas (García *et al.*, 2014) y mal manejo agronómico (Vaast y Somarriba, 2014). Colombia se encuentra dentro del origen geográfico del cacao, por lo que posee una amplia diversidad genética (Thomas *et al.*, 2012; Osorio *et al.*, 2017).

El uso de genotipos altamente productivos es esencial para aumentar el rendimiento del cacao, disminuir la incidencia de enfermedades y contribuir al valor agregado al aumentar la calidad del sabor y el aroma. El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño agronómico de ocho genotipos de cacao establecidos en un sistema agroforestal con maderas finas tropicales.

Material y métodos

Se evaluaron ocho genotipos de cacao, identificados: (Theobroma Corpoica La Suiza) TCS, SCC (selección Colombia Corpoica) y CCS (colección Corpoica La Suiza) acompañados de un número de denominación, como se enumera: TCS13, TCS19, SCC53, SCC82, SCC83, CCS73 CCS77, CCS80. Se evaluaron en comparación con el control comercial introducido ICS95 (imperial collage selection), seleccionado por su aceptación por parte de los productores, su amplia distribución y buen desempeño agronómico en todo el país, así como la baja incidencia de pudrición helada de la vaina. La evaluación de los clones se realizó en la región natural andina, en cuatro localidades, pertenecientes a las subregiones de Montaña Santandereana y Magdalena Medio (Cuadro 1), ubicadas entre 300 y 900 m de altitud, durante cuatro años de producción.

Cuadro 1. Características climáticas de las regiones utilizadas para la evaluación agronómica y fitosanitaria de clones de cacao.

Localidades	Pueblo	Latitud	Longitud	HR (%)	T (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (m)	Subregión natural
El Carmen	San Luis	06°47'8.2"	73°36'7.5"	75	28-32	1 500-1 800	300	Magdalena Medio
Muzo	Ejidos	05°32'26.7"	74°05'48.1"	80	22-25	1 800-2 200	900	Montaña Santandereana
Rionegro	Alto Bello	07°22'12.5"	73°10'49.6"	85	27-30	1 800-2 000	530	Montaña Santandereana
Santa Rosa	El Diamante	07°58'12.8"	74°03'49.2"	75	22-25	1 500-2 000	629	Magdalena Medio

En las cuatro localidades las pruebas de evaluación agronómica se establecieron en sistemas agroforestales con maderas finas tropicales, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres arreglos de sombra permanente, Abarco (*Cariniana piryformis*), teca (*Tectona grandis*), árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*) y plátano (*Musa* sp.) utilizado como sombra transitoria. En el diseño experimental se evaluaron nueve tratamientos correspondientes a los nueve genotipos de cacao, dos repeticiones por tratamiento y cuatro plantas efectivas.

Los genotipos de cacao se establecieron a una densidad con árboles espaciados a 3 m x 3 m en triángulo y distribuidos aleatoriamente en cada parcela. La sombra permanente se estableció a una densidad con árboles espaciados a 4 m x 4 m, en barreras de doble línea, incorporando cinco líneas de cacao entre barreras. En condiciones de invernadero el cacao se injertó en su totalidad en el IMC67 para evitar la variación causada por el portainjerto. El manejo agronómico en cada parcela de las localidades se realizó de acuerdo con los resultados del análisis previo de fertilidad del suelo y requerimientos del cultivo. Para cada año se realizaron dos podas de mantenimiento en el cultivo, según el crecimiento y desarrollo de las plantas, una poda principal al final de la estación seca entre los meses de marzo y abril y una segunda poda en menor medida entre los meses de agosto y septiembre a medida que disminuyen las precipitaciones.

El control de malezas se realizó cuatro veces al año, principalmente en los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre. Se realizó un control cultural de las enfermedades con la eliminación semanal de los frutos enfermos, que coincidió con los registros de sanidad realizados. La variable

de rendimiento expresada en kilogramos por árbol durante un año ($\text{kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se cuantificó después del quinto año de establecimiento de los genotipos (cuando las plantas alcanzan su potencial productivo), una evaluación registrada durante cuatro años consecutivos. Adicionalmente, se cuantificaron los componentes del rendimiento, relacionados con el número de vainas de cacao por árbol, índice de vaina (número de vainas de cacao necesarias para obtener 1 kg de cacao fermentado y seco), número de granos por vaina de cacao e índice de grano (peso promedio de un grano de cacao, obtenido de una muestra de 100 granos fermentados y secos).

La evaluación de la respuesta fitosanitaria en los genotipos se realizó bajo condiciones de presión de inóculo natural en cada una de las zonas. Las principales enfermedades evaluadas en su incidencia fueron: pudrición helada de la vaina (*Moniliophthora roreri*), escoba de la bruja (*Moniliophthora perniciosa*) y pudrición parda (*Phytophthora* sp.). Para ello, se aplicó el cálculo de la incidencia mediante la siguiente fórmula: $\text{Incidencia (\%)} = \frac{\text{NMA}}{\text{NMA} + \text{NMS}} \times 100$. NMA= número de vainas de cacao afectadas por la pudrición helada, escoba de la bruja o *Phytophthora* sp., NMS= número de vainas de cacao sanas.

Para identificar el comportamiento reproductivo de los ocho genotipos, en términos de dependencia o no del polen, se realizó la caracterización de la compatibilidad sexual para cada uno de los materiales genéticos bajo estudio. Las evaluaciones se realizaron en dos localidades, Rionegro y Muzo, seleccionadas por sus diferencias en altitud y precipitación anual. La polinización manual se llevó a cabo en 50 flores para cada genotipo en el mismo año, tanto por autopolinización como por polinización cruzada, métodos realizados de acuerdo con los procesos rutinarios en el programa de mejoramiento de Agrosavia.

Quince días después de la polinización se evaluó la efectividad, cuantificando la formación de frutos en cada polinización. La autocompatibilidad y la intercompatibilidad se determinaron cuando el porcentaje de cruza exitosas fue igual o superior al 30%, siguiendo metodologías y parámetros descritos anteriormente (Eskes *et al.*, 2000; Royaert *et al.*, 2011). Los datos de las variables fueron sometidos a análisis de normalidad, utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov con 95% de confianza, y análisis de homogeneidad utilizando la prueba de Bartlett al 95%. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (Anova) con un intervalo de confianza del 98%.

Para evaluar el efecto de la sombra permanente, el análisis consistió en un diseño factorial completo de efectos fijos con un arreglo de campo completamente aleatorio desbalanceado. Se evaluaron dos factores, el primer factor correspondió al genotipo y presentó nueve niveles, mientras que el factor dos correspondió al tipo de sombra, que consistió en tres niveles. Se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov al 95% de confianza para evaluar la normalidad y una prueba de Bartlett al 95% para evaluar la homocedasticidad, encontrando diferencias, el análisis comparativo de medias se realizó utilizando la metodología de la diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de confianza del 95%.

Para los índices de enfermedad, considerando las evaluaciones en condiciones de presión de inóculo natural, se realizó un análisis de conglomerados para agrupar individuos similares o con las mismas características. Esta estadística no es inferencial, por lo que no se utilizaron intervalos de confianza ni pruebas para encontrar similitudes. Las áreas rojas representaron los lugares con mayor incidencia de la enfermedad, mientras que las áreas azules expresaron lo contrario. Todos los análisis se realizaron con el paquete de software estadístico R V. 3.5.3 (R Core Team, 2019).

Resultados

Los resultados de rendimiento ($\text{kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$) mediante el análisis de varianza indicaron diferencias significativas para los tratamientos (genotipos) evaluados en cada año y en cada localidad (Figura 1). El rendimiento aumentó para la mayoría de los genotipos durante el segundo y tercer año de evaluación, para el cuarto año presentó una caída. Por otro lado, el rendimiento medio, considerando las localidades, indicó un mayor potencial en las condiciones ambientales en el municipio de Muzo con un estimado de $1\,241 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, las localidades de Carmen y Rionegro presentaron un rendimiento medio similar (829 y $869 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente), mientras que Santa Rosa presentó el rendimiento medio más bajo ($749.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

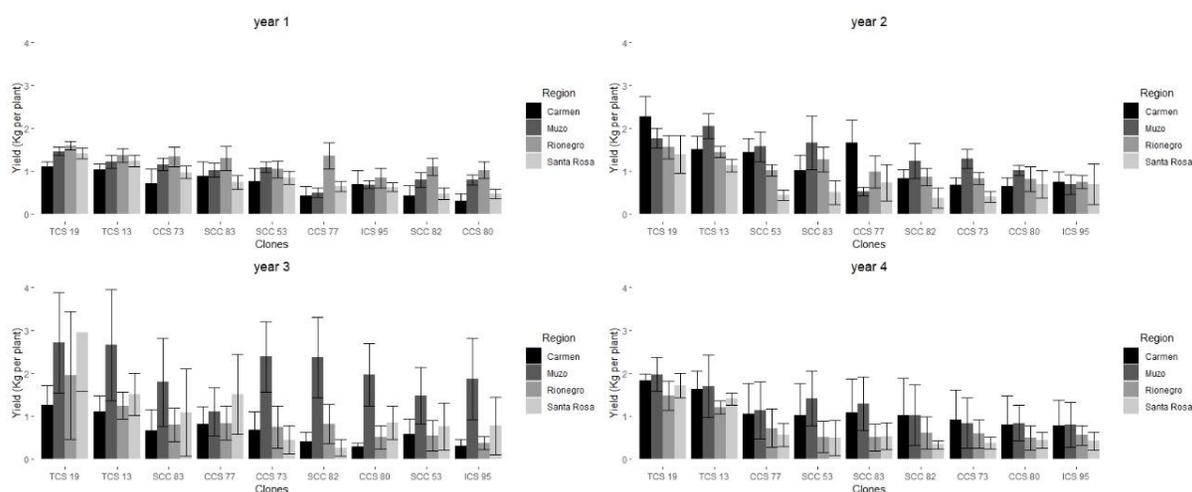


Figura 1. Rendimiento de grano seco de nueve genotipos de cacao evaluados en cuatro localidades productoras de cacao en Colombia. El Carmen (Santander), Rionegro (Santander), Muzo (Boyacá) y Santa Rosa del Sur (Bolívar) consolidado por año. Diferencias estadísticas ($p < 0.05$). Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

En cuanto a los tratamientos, los genotipos con mejor respuesta fueron TCS13 y TCS19 (Cuadro 2) con una media general de 1.5 y $1.8 \text{ kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (proyectando un rendimiento de $1\,350$ y $1\,620 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente) a través de los años y localidades evaluadas. En las diferentes parcelas experimentales, las producciones de los genotipos evaluados fueron superiores al rendimiento promedio en Colombia por la Federación Nacional de cacaoteros (Fedecacao).

Cuadro 2. Promedios de componentes de rendimiento evaluados en nueve clones de cacao en cuatro localidades en las regiones de Montaña Santander y Magdalena Medio, productoras en Colombia.

Clon	Rendimiento promedio (kg planta^{-1})	Número de vainas	Número de granos por vaina	Índice de vaina	Índice de grano
TCS19	1.8 A	27.5 A	39 B	16.5 BC	1.6 CD
TCS13	1.5 B	19.8 B	41.9 AB	14 DE	1.8 B
SCC83	1 C	12.3 CD	43.4 A	17.2 B	1.5 DE
SCC53	0.9 C	11.05 DE	43.6 A	17.3 B	1.43 E

Clon	Rendimiento promedio (kg planta ⁻¹)	Número de vainas	Número de granos por vaina	Índice de vaina	Índice de grano
CCS73	0.9 CD	9.59 F	37.2 C	13.75 E	2.05 A
CCS77	0.9 CD	12.31 C	38.2 C	16 CD	1.7 BC
SCC82	0.8 CD	11.63 CD	39.2 B	17 B	1.5 DE
CCS80	0.7 D	10.13 EF	37.2 C	15.2 DE	1.8 B
ICS95	0.7 D	10.04 EF	36 C	19 A	1.53 DE
Promedio	1.01	13.83	39.14	16.19	1.65

Medias con la misma letra no difieren estadísticamente. Prueba de diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de confianza del 95%.

Las variables de componentes de rendimiento con mayor contribución a la variación fenotípica total fueron el rendimiento y el número de vainas por árbol (Cuadro 2), para esta última variable el mejor clon fue TCS19, seguido de TCS13 presentando diferencias significativas con el control ICS95. El rendimiento obtenido con los genotipos evaluados se correlacionó positivamente con un mayor número de vainas por árbol, número de granos por vaina y negativamente con la incidencia de pudrición helada de la vaina. El clon CCS73 presentó el índice de grano más alto y el mejor índice de vaina, seguido por el clon TCS13 presentando diferencias significativas con el control.

El análisis de interacción entre el genotipo y el tipo de sombra fue significativo con un 98% de confianza, mostrando diferencias significativas entre las interacciones. La mejor respuesta en el rendimiento fue para las interacciones genotipo-*Cariniana piryformis* (Figura 2), seguidas por la interacción genotipo-*Tectona grandis* y finalmente la interacción genotipo-*Hevea brasiliensis*, presentando los rendimientos más bajos para la mayoría de los tratamientos. Los genotipos de mejor respuesta fueron TCS19, independientemente del tipo de sombra, seguidos de TCS13 con sombra *T. grandis* y *C. piryformis*, superando al control ICS95, que presentó su mejor desempeño asociado a *C. piryformis* mostrando diferencias significativas con *H. brasiliensis*.

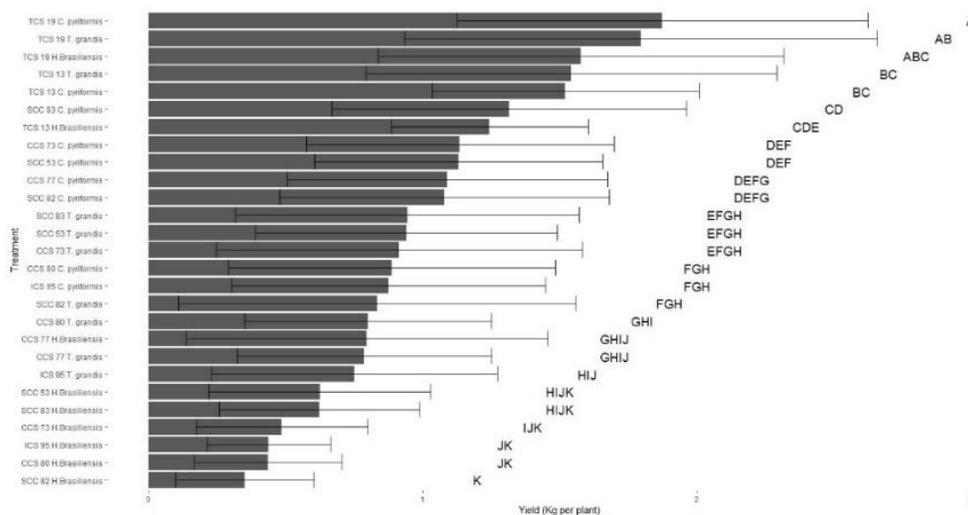


Figura 2. Rendimiento de clones de cacao evaluados en interacción con tres tipos de sombra permanente, maderas finas tropicales de *Cariniana piryformis*, *Tectona grandis* y *Hevea brasiliensis*. Las medias con la misma letra no presentan diferencias significativas mediante la prueba de DMS. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

La respuesta de los genotipos de cacao a la incidencia de enfermedades en condiciones de presión de inóculo natural indicó que en el caso de *M. rozeri*, *M. pernicioso* y *Phytophthora* sp. se presentaron diferentes niveles en las localidades estudiadas, así como entre los genotipos evaluados (Figura 3). La enfermedad de la pudrición helada de la vaina se presentó con una mayor incidencia en las localidades de Rionegro y Santa Rosa (Figura 3 arriba a la izquierda), formando un grupo separado alrededor de las localidades de Carmen y Muzo donde la incidencia fue menor.

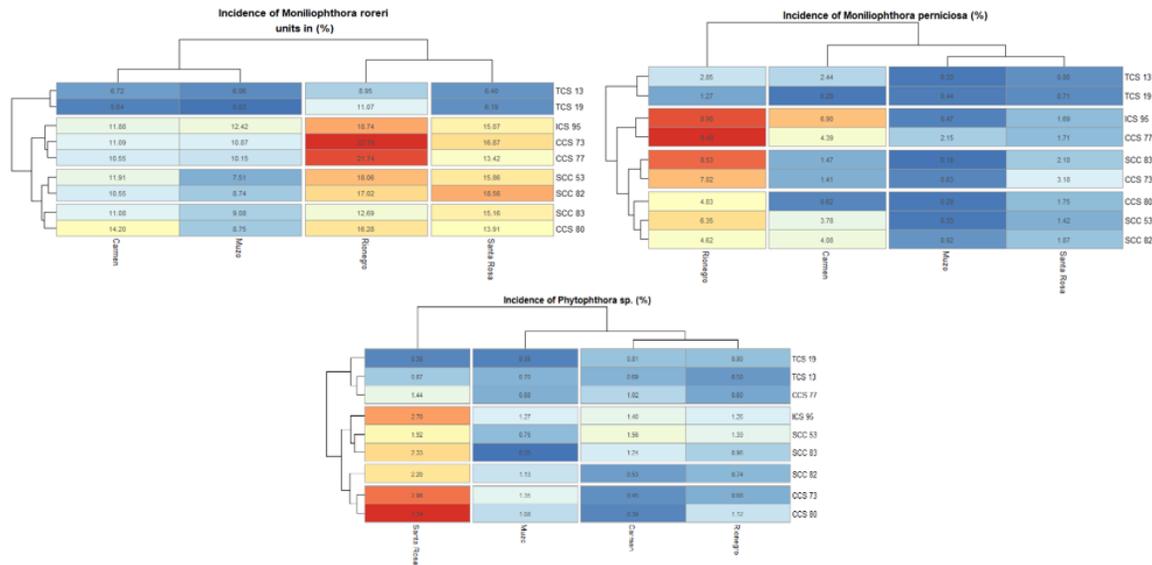


Figura 3. Incidencia de enfermedades: arriba a la izquierda: pudrición helada de la vaina (*Moniliophthora rozeri*), arriba a la derecha: escoba de la bruja (*Moniliophthora pernicioso*) y abajo: *Phytophthora* sp. en nueve clones de cacao. Evaluaciones realizadas bajo condiciones de epidemias naturales en cuatro localidades de Montaña Santandereana y Magdalena Medio, región natural andina, durante cuatro años de evaluación en etapa productiva.

En el caso de la escoba de la bruja (*M. pernicioso*), la mayor incidencia ocurrió en el municipio de Rionegro, formando un grupo independiente en comparación con las otras tres localidades, muy similar al caso de *Phytophthora* sp., en el municipio de Santa Rosa (Figura 3 a la derecha, abajo), aunque los niveles de incidencia fueron muy bajos. Los genotipos con mejor respuesta a las tres enfermedades fueron TCS13 y TCS19, presentando menores niveles de incidencia en las cuatro localidades evaluadas, consolidando un grupo separado respecto al control ICS95.

Los resultados en la formación de frutos a partir de la autopolinización indicaron que los genotipos TCS13 (52%), TCS19 (40%) y SCC82 (42%) son autocompatibles (SC), evaluaciones realizadas en las localidades de Rionegro y Muzo (Figura 4). En los otros genotipos evaluados, se determinó su autoincompatibilidad (SI), dado su bajo porcentaje de formación de frutos, inferior al 30%. Cabe destacar que para los materiales ICS95 y CCS77 se obtuvieron porcentajes de efectividad (SI) de amarre de frutos de 25 y 26% respectivamente. Sin embargo, el nivel mínimo es decisivo para clasificar la autocompatibilidad del genotipo.

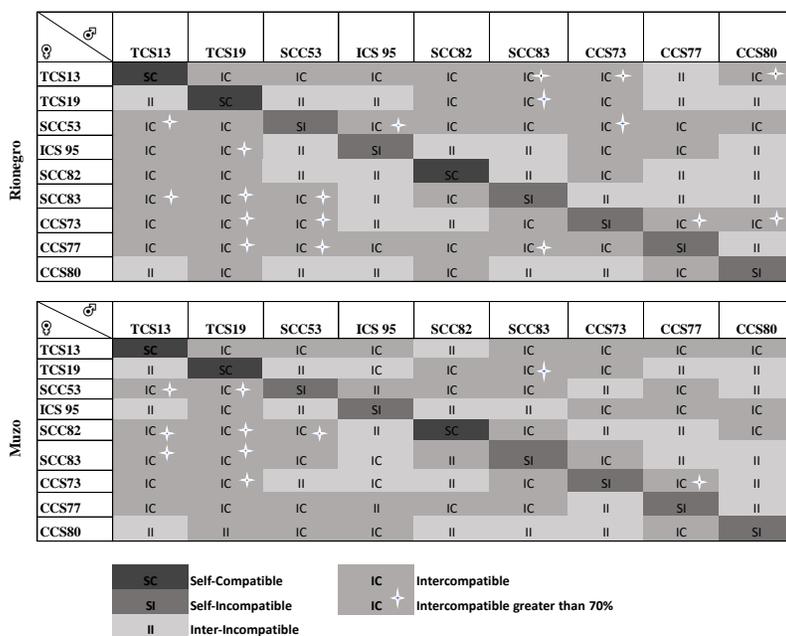


Figura 4. Grado de compatibilidad entre las combinaciones de los nueve genotipos de cacao bajo estudio. Evaluaciones realizadas en las subregiones naturales de Montaña Santandereana y Magdalena Medio, localidades correspondientes a los municipios de Rionegro y Muzo.

El genotipo TCS19 se destacó como donante de polen, presentando intercompatibilidad con los otros genotipos, excepto con CCS80 en Muzo. A su vez, el genotipo TCS13 generalmente es un buen receptor de polen, considerando que presentó intercompatibilidad con la mayoría de los tratamientos, excepto con el genotipo CCS77 en Rionegro y SCC82 en Muzo, en general, su respuesta varía en cuanto a las condiciones, presentó mejores porcentajes de compatibilidad en Rionegro. El genotipo CCS80 tuvo la mayor intercompatibilidad, independientemente de las dos condiciones de evaluación, a su vez, junto con el genotipo SCC82, presentó la mayor inestabilidad en su respuesta para las dos localidades (es decir, Rionegro y Muzo).

Discusiones

El rendimiento medio obtenido para los genotipos evaluados en el presente estudio (1.02 kg árbol⁻¹ año⁻¹) respecto a la densidad de plantación establecida (900 plantas ha⁻¹) indicó un potencial de rendimiento de 922.4 kg ha⁻¹ año⁻¹, rendimiento superior al promedio nacional (0.53 t ha⁻¹) en 2018. Con estos resultados se puede inferir que el problema de los bajos rendimientos de cacao en el país se puede aumentar con materiales genéticos de alto rendimiento junto con un manejo agronómico adecuado, así como la interacción con el uso de sombra (Lahive *et al.*, 2019). Los genotipos TCS19 y TCS13 presentaron potencial productivo superior a 1 t ha⁻¹. TCS19 fue el de mayor rendimiento y el más estable a través de las localidades evaluadas, indicando una menor interacción genotipo-por-ambiente, variedad con proyección de adaptación general a las diferentes condiciones agroecológicas de producción.

La localidad de Muzo presentó un rendimiento promedio potencial de 1.2 t ha⁻¹ año⁻¹, considerando todos los genotipos evaluados, superior a las otras localidades, indicando posibles condiciones agroecológicas y climáticas óptimas (Schroth *et al.*, 2016) para el cultivo del cacao, especialmente

precipitación anual entre 2 000 y 2 600 mm y temperatura entre 22 y 25 °C. La disminución del rendimiento en el cuarto año de evaluación se correlaciona con el aumento de la incidencia de pudrición helada de la vaina, la principal enfermedad limitante del cacao en Colombia, que se ha registrado con altos niveles de incidencia en diferentes zonas productoras de cacao del país (Cubillos, 2017).

En el cuarto año de evaluación hubo una variación en las condiciones climáticas, principalmente con la disminución anual y la fluctuación mensual de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas máximas mensuales. Sin embargo, la distribución de las precipitaciones y la duración del período seco se consideran factores más importantes en la idoneidad climática para el cultivo del cacao (Schroth *et al.*, 2016), que la precipitación acumulada, nuestros resultados indicaron que la distribución de las precipitaciones en el año 4 presentó un mayor número de meses secos, con precipitaciones menores a 100 mm, en la mayoría de las localidades.

La mayor incidencia de pudrición helada de la vaina presentada en el año 4, en comparación con años anteriores, puede deberse al estrés que los períodos secos pueden generar en las plantas de cacao, ya que es una condición que puede no favorecer el desarrollo de las epidemias causadas por *M. royeri*. El desarrollo de la epidemia es favorecido por condiciones con mayor frecuencia de precipitación (Leandro-Muñoz *et al.*, 2017) y varían según la localidad, los genotipos, el tiempo de observación y el número de vainas producidas (Jaimés *et al.*, 2019).

En las plantas, los estreses generados por condiciones climáticas no óptimas para su crecimiento provocan un desequilibrio homeostático, induciendo a la planta a compensar. Esto puede predisponer a las plantas a ataques severos de patógenos hemibiotróficos con bajas concentraciones de inóculo (Bostock *et al.*, 2014), como podría ocurrir para *M. royeri* durante este período. La no disponibilidad de recursos hídricos de acuerdo con los requerimientos de la planta, así como la salinidad, son factores ambientales que causan el mayor impacto en el desarrollo y productividad de las plantas, presentando una reducción en los rendimientos de los cultivos (Golldack *et al.*, 2014).

En el cultivo de cacao en Colombia predomina el uso de sombra en 75% (Somarriba y López, 2018), ofreciendo ventajas ecofisiológicas donde el tipo de sombra influye en la respuesta en variables de intercambio gaseoso como la fotosíntesis, que contribuye directamente en el crecimiento y productividad de las plantas (Agudelo *et al.*, 2018), sumado a la adaptación y mitigación a condiciones de variabilidad climática (Lahive *et al.*, 2019).

Nuestros resultados muestran una respuesta productiva superior para los genotipos evaluados en el sistema agroforestal con *Cariniana piryformis*, una especie nativa comúnmente conocida como ‘abarco’, que representa un forestal potencial para incorporar como sombra permanente, aunque los tres forestales proyectan un nivel de sombra entre 60 y 70%, *C. piryformis* no presenta una fuerte defoliación en la estación seca que pueda afectar los niveles de radiación y consecuentemente la tasa fotosintética en cacao (Agudelo *et al.*, 2018), también se destaca el valor agregado por su calidad en la madera fina y la contribución a la conservación de los bosques dado que se encuentra en estado amenazado (Cárdenas *et al.*, 2015; Sarmiento *et al.*, 2019), además se evidenciaron niveles más bajos de moniliasis en comparación con los sistemas agroforestales con teca y árbol de caucho.

Aunque en las localidades la incidencia de las enfermedades fue baja, los mayores porcentajes de incidencia de *M. rozeri* y *M. pernicioso* ocurrieron en la parcela experimental de Rionegro (Figura 3). En las condiciones de este municipio se han reportado altas incidencias de moniliasis del 48.8% (Cubillos, 2017). En este sentido, la mayoría de los genotipos bajo las condiciones del APS evaluado tienen una buena respuesta a esta enfermedad, en comparación con el control ICS95, que se reporta como moderadamente resistente en la misma localidad (Jaimes *et al.*, 2019) y donde se estima mayor variabilidad del patógeno debido a la ubicación del banco de germoplasma de cacao.

Los genotipos con mejor respuesta a la presencia de estas tres enfermedades fueron TCS19 y TCS13 (Figura 3), esto sumado al mejor rendimiento de grano y mayor número de vainas de cacao por árbol, TCS13 en comparación con TCS19 presentó un mejor índice de vaina de cacao, requiriendo un promedio de 14 vainas de cacao por kg de grano seco, esto debido a un mayor índice de grano superando al control ICS95. Estas características llevaron a su selección como variedades para el establecimiento de producción comercial en las regiones de Montaña Santandereana y Magdalena Medio, adicionalmente, para ser incorporadas como líneas parentales en el programa de mejoramiento de Agrosavia.

El cacao se considera una especie preferentemente de polinización cruzada, evidenciado por su alta tasa de autoincompatibilidad y su morfología floral. La intercompatibilidad entre materiales genéticos es muy importante para definir los arreglos de siembra que permitan aumentar la producción de frutos. Los dos genotipos superiores obtendidos presentaron autocompatibilidad e intercompatibilidad para TCS13-TCS19, pero TCS19 no recibe polen de TCS13.

Esto indica que es posible establecer producciones homogéneas con cada clon. En el caso de los diseños de siembra, se recomienda establecer producciones con combinaciones de variedades específicas, especialmente para el clon TCS19 que presentó una mayor interincompatibilidad en comparación con TCS13, esto con el objetivo de aumentar la producción por unidad de área, los rendimientos de cacao se pueden mejorar con la selección óptima de variedades clonales durante el establecimiento de una nueva plantación (López *et al.*, 2021) al presentar una mayor oportunidad para combinaciones compatibles.

Conclusiones

Los genotipos TCS13 y TCS19 se destacaron en rendimiento promedio, número de vainas, baja incidencia natural de enfermedades, bajo sistema agroforestal con *Cariniana piryformis*. Estos genotipos se registraron para uso comercial, pero también pueden ser considerados como progenitores en programas de mejoramiento y deben ser evaluados en cruces con otros genotipos, como el genotipo CCS73 por su índice de grano sobresaliente (2.05), con el objetivo de aumentar la productividad del cacao.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) por el apoyo financiero y al personal Orlando Güiza, Gilberto Moreno, Fredy Forero (Centro de Investigación 'La Suiza') por su apoyo en las actividades de campo.

Literatura citada

- Abbott, P. C.; Benjamin, T. J.; Burniske, G. R.; Croft, M. M.; Fenton, M. C.; Kelly, C. R.; Lundy, M. M.; Rodríguez, C. F. and Wilcox, M. D. 2018. An analysis of the supply chain of cacao in Colombia. United states agency for international development (USAID). Washington, DC, USA. Cali. CO. 74-78 pp.
- Agudelo, C. G. A.; Cadena, T. J.; Almanza, M. P. J. y Pinzón, S. E. H. 2018. Desempeño fisiológico de nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo la sombra de tres especies forestales en Santander, Colombia. Rev. Colomb. Cienc. Hortíc. 12(1):223-232. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7341>.
- Bostock, R. M.; Pye, M. F. and Roubtsova, T. V. 2014. Predisposition in plant disease: exploiting the nexus in abiotic and biotic stress perception and response. Annu. Rev. Phytopathol. 52(1):517-549.
- Core, T. R. 2019. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Cubillos, G. 2017. Frosty pod rot, disease that affects the cocoa (*Theobroma cacao*) crops in Colombia. Crop Protec. 96(2017):77-82. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.011>.
- Eskes, A. B.; Engels, J. M. M. and Lass, R. A. 2000. Working procedures for cocoa germplasm evaluation and selection. Proceedings of the CFC/ICCO/IPGRI Project Workshop. Montpellier, France. IPGRI, Rome, Italy. 95-99 pp.
- García, C. R. G.; Perdomo, A. M.; Ortiz, R.; Beltrán, P. and López, K. 2014. Characterization of the supply and value chains of Colombian cocoa. Dyna. 81(187):30-40. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.39555>.
- García, G. A. G.; Gutiérrez, M. I.; Núñez, H. E. H.; Salazar, J. C. S. and Casanoves, F. 2020. Relevance of local knowledge in decision-making and rural innovation: a methodological proposal for leveraging participation of Colombian cocoa producers. J. Rural Studies. 75(2020):119-124. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.01.012>.
- Golldack, D. B.; Li, C.; Mohan, H. and Probst, N. 2014. Tolerance to drought and salt stress in plants: unraveling the signaling networks. Front. Plant Sci. 5(2014):151-161.
- ICCO. 2021. International cocoa organization. Quarterly bulletin of cocoa statistics. London, UK. 47(3):11-7.
- Jaimes, Y. Y.; Ribeyre, F.; Gonzalez, C.; Rojas, J.; Furtado, E. L. and Cilas, C. 2019. Factors affecting the dynamics of frosty pod rot in the main cocoa areas of Santander state, Colombia. Plant Dis. 103(7):1665-1673. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-18-1761-RE>.
- Leandro, M. M. E.; Tixier, P.; Germon, A.; Rakotobe, V.; Phillips, M. W.; Maximova, S. and Avelino, J. 2017. Effects of microclimatic variables on the symptoms and signs onset of *Moniliophthora roreri*, causal agent of *Moniliophthora* pod rot in cacao. PLoS One. 12(10):e0184-638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184638>.
- López, M. E.; Ramírez, O. A.; Dubón, A.; Ribeiro, T. H. C.; Díaz, F. J. and Chalfun, J. A. 2021. Sexual compatibility in cacao clones drives arrangements in the field leading to high yield. Sci. Hortic. 287(16):110-276. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110276>.
- Osorio, G. J. A.; Berdugo, C. J.; Coronado, R. A.; Zapata, Y. P.; Quintero, C.; Gallego, S. G. and Yockteng, R. 2017. Colombia a source of cacao genetic diversity as revealed by the population structure analysis of germplasm bank of *Theobroma cacao* L. Front. Plant Sci. 8(1994):1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01994>.

- Quintana, F. L. F.; García, J. A. y Moreno, M. E. 2018. Perfil sensorial de cuatro modelos de siembra de cacao en Colombia. *Entramado*. 14(2):256-268.
- Royaert, S.; Phillips, M. W.; Arciniegas, L. A. M.; Cariaga, K.; Brown, J. S.; Kuhn, D. N. and Motamayor, J. C. 2011. Identification of marker-trait associations for self-compatibility in a segregating mapping population of *Theobroma cacao* L. *Tree Genet. Genomes*. 7(6):1159-1168. <https://doi.org/10.1007/s11295-011-0403-5>.
- Sarmiento, A. I. P.; Caicedo, D. A. Z.; Peláez, J. J. Z. and Garzón, S. L. C. 2019. Seedling emergency and biometry of fruits and seeds of *Cariniana pyriformis* from the middle Magdalena Valley, Colombia. *Cerne*. 25(2):221-229. <https://doi.org/10.1590/01047760201925022596>.
- Schroth, G.; Läderach, P. R.; Martinez, V. A. I.; Bunn, C. and Jassogne, L. T. P. 2016. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: patterns, opportunities and limits to adaptation. *Sci. Total Environ*. 556(2016):231-241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.024>.
- Somarriba, E. J. and López, S. A. 2018. Coffee and cocoa agroforestry systems: pathways to deforestation, reforestation, and tree cover change. International Bank for Reconstruction and development/The World Bank, Washington, DC. USA. 50 p.
- Thomas, E.; Van, Z. M.; Loo, J.; Hodgkin, T.; Galluzzi, G. and Van, E. J. 2012. Present spatial diversity patterns of *Theobroma cacao* L. in the neotropics reflect genetic differentiation in Pleistocene refugia followed by human-influenced dispersal. *PLoS One*. 7(10):e47-676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047676>.
- Vaast, P. and Somarriba, E. J. 2014. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agrofor. Syst*. 88(6):947-956. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>.