

Determinación de atributos en genotipos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en la rotación maíz-soya asociados a suelos ácidos mejorados de la altillanura colombiana

Determination of Attributes in Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) Genotypes in Corn-Soybean Rotation Associated with Acid Amended Soils in the Colombian Eastern Plains

Luis Fernando Campuzano-Duque,¹ Samuel Caicedo-Guerrero,² Judith Guevara-Agudelo³

¹ PhD, Colegio Posgraduados-Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Cimmyt). Investigador PhD, Corpoica. Villavicencio, Colombia. lcampuzano@corpoica.org.co

² MsC, Colegio de Postgraduados de Chapingo. Investigador Máster, Corpoica. Villavicencio, Colombia. scaicedo@corpoica.org.co

³ PhD, Universidade Federal de Lavras. Investigadora PhD, Corpoica. Villavicencio, Colombia. eguevara@corpoica.org.co

Fecha de recepción: 19/02/2014

Fecha de aceptación: 19/05/2015

Para citar este artículo: Campuzano-Duque LF, Caicedo-Guerrero S, Guevara-Agudelo J. Determinación de atributos en genotipos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en la rotación maíz-soya asociados a suelos ácidos mejorados de la altillanura colombiana. Corpoica Cienc Tecnol Agropecu. 16(2): 251-263

Abstract

For the last 15 years, Colombia has developed a research process leading to the expansion of its agricultural frontier at the flat well drained savannas of the Eastern Plains, by improving predominantly acid soils with liming to increase base saturation with depth, vertical liming—as its referred locally—, crop rotation with rice, corn, soybeans, and with the potential to include other crops like cotton in the rotation system. To achieve this, a pioneering research in Colombia was conducted to determine the adaptation of cotton in the acid conditions of the high plains improved sheets. An Agronomic evaluation test was developed using five elite genotypes of cotton in a design of a randomized complete block at four locations in soils with base saturation above 80%. The results identified a genotype (LC-156), which presented an adaptation to the high plains, associated with an average yield of 2.2 t/ha of cottonseed, 1.5 t/ha of cotton fiber type medium-long, a percentage of fiber extraction above 36.0%. The comparative advantage of this region for sustainable cotton production is given by the yield of cotton fiber—which is higher than the national average—, to the 33.2% reduction in production costs, the quality of long/medium-fiber destined for export and the absence of the pest insect of greatest economic impact in Colombia: the weevil (*Anthonomus grandis* Boheman).

Key words: *Gossypium hirsutum* L., Genetic stability, Soil improvement, Altillanura plana colombiana

Resumen

En Colombia, en los últimos 15 años, se ha desarrollado un proceso de investigación para la ampliación de la frontera agrícola focalizado en la altillanura plana, con énfasis en la construcción de capa arable asociado a la saturación de bases, mediante el encalamiento, la labranza vertical y la rotación arroz, maíz y soya, con la posibilidad de otras especies como el algodón que podrían ingresar al modelo. Para ello, se realizó una investigación pionera en Colombia para determinar la adaptación del algodón en las condiciones de las sabanas ácidas mejoradas de la altillanura. Se desarrolló una prueba de evaluación agronómica con cinco genotipos éliticos de algodón en un diseño de bloques completos al azar en cuatro localidades en suelos con una saturación de bases superior al 80%. Los resultados permitieron identificar un genotipo (LC-156), que presentó una adaptación a la altillanura, asociado a un rendimiento promedio de 2,2 t/ha de algodón semilla, 1,5 t/ha de algodón tipo fibra media a larga y un porcentaje de extracción de fibra superior al 36,0%. La ventaja comparativa de esta región para una producción sostenible de algodón está dado por el rendimiento de algodón fibra superior al promedio nacional, reducción del 33,2% en los costos de producción, calidad de fibra media larga con destino para la exportación y la ausencia del insecto plaga de mayor importancia económica en Colombia, el picudo (*Anthonomus grandis* Boheman).

Palabras clave: *Gossypium hirsutum* L., estabilidad genética, mejora de suelos, altillanura plana colombiana

Introducción

El algodón es producido en casi 100 países, pero solo 5 concentran la mayor proporción de la producción mundial (China, 27%; Estados Unidos, 18%; India, 11%; Pakistán, 9% y Brasil, 5%) y Colombia ocupa el puesto 35 con una participación del 0,15% de la producción mundial. Su cultivo se realiza principalmente en los departamentos de Córdoba, Tolima y Cesar con una participación del 41,9%, 32,5% y 12,0%, respectivamente. En el año 2014 se registró en el país una producción 30.705 toneladas de fibra en 33.516 ha de las cuales 21.500 ha fueron en la región de la costa Caribe y 11.000 ha en el interior (Confederación Colombiana del Algodón c2012). El rendimiento por hectárea de algodón de semilla en Colombia ha tenido un importante crecimiento al pasar de 1,5 t/ha en 1990 a 2,1 t/ha en 2014, promedio que es superior al nivel mundial, de 1,9 t/ha, y al de los países de la CAN, de 1,5 t/ha (OCDE-FAO 2011; Comité Consultivo Internacional del Algodón 2012).

La competitividad del algodón en Colombia ha mejorado sustancialmente con el incremento en el rendimiento; sin embargo, aún existe una brecha por los costos de producción, especialmente en el valor de la tierra y los insumos. Por esta razón, existe la necesidad de buscar áreas potenciales en el país para ampliar la frontera del algodón y la altillanura se perfila como una región con aptitud, no obstante de su condición de suelos ácidos. Estos suelos representan una limitante productiva para la humanidad, se estima que el 40% de la superficie arable del mundo presenta este problema (68% en América, 38% en Asia, 27% en África y en menores proporciones en Europa y Australia con 9% y 6%, respectivamente), la mayor parte en áreas forestales (67%) y el 18% en sabanas nativas (Von Uexküll y Mutert 1995).

En el caso particular de Colombia, cerca del 80% de los suelos presentan esta condición en la Orinoquía, caracterizados por su toxicidad con aluminio y manganeso, alta fijación de fósforo y deficiencias de calcio, magnesio, hierro y molibdeno, con pH bajos que solubilizan las formas iónicas de aluminio en la solución del suelo, lo que hace a este elemento tóxico para la plantas e inhibe el crecimiento y la función radicular, incrementa la susceptibilidad a sequía y limita la absorción eficiente de nutrientes y ocasiona pérdidas en la producción (Foy et al. 1978; Rout et al. 2001; Adams y Moore 1983; Malagón 2003; Camacho-Tamayo et al. 2008).

La tolerancia de las especies vegetales al aluminio ha sido el principal concepto en la aplicación de la mejora genética (Delhaize y Ryan 1995; Kochian et al. 2004), con el aprovechamiento de la variabilidad dentro y entre especies con sensibilidad de moderada a alta al aluminio como el trigo, cebada, maíz, soya, frijol y algodón y el uso de metodologías específicas para la selección, que incluyen la identificación e introgresión de genes monogénicos y poligénicos asociados a la tolerancia (Nicholaides y Piha 1987; Caudle 1991). Los resultados significativos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Cimmyt) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) demostraron, en maíz, la existencia de alta variabilidad, heredabilidad y ganancias genéticas para la tolerancia a acidez por aluminio, que permitieron el desarrollo de poblaciones específicas denominadas AS (por sus iniciales en inglés: acid soils): AS3-AS7, con usos directos en Brasil, Perú, Venezuela y Colombia (Pandey et al. 1994; Duque-Vargas et al. 1994) y con ganancias genéticas del 2% al 14% por ciclo de selección (Granados et al. 1993; Ceballos et al. 1995).

En Colombia, resultados similares fueron obtenidos en soya, por Corpoica, con la evaluación intensiva de introducciones de la colección mundial, poblaciones segregantes y líneas avanzadas para obtener las primeras líneas de soya tolerantes al 70% de saturación de aluminio, denominadas Litas las cuales dieron origen a la primera variedad de soya Soyica Altillanura 2, para suelos ácidos (Valencia 2006).

En el pasado, la investigación en la altillanura colombiana se focalizó en la reducción de la acidez del suelo con la aplicación de altas cantidades de cal y en establecimiento de cultivos sensibles al aluminio; sin embargo, esta estrategia resultó costosa y poco aplicable. Posterior a esta experiencia, se desarrolló el concepto de “construcción de capa arable” para la conversión de sabanas nativas improductivas a sabanas mejoradas productivas basado en la labranza vertical, el encalamiento y la colonización con un sistema de rotación arroz-soya-maíz con el criterio de una saturación de bases superior al 40%, como una medida de disponibilidad de nutrientes y de fertilidad de los suelos (Centro Internacional de Agricultura Tropical 2013). Este concepto y su desarrollo por más de 15 años en la altillanura, permitió la incorporación de más de 20.000 hectáreas acompañado de la oferta de variedades de soya como Orinoquía 3, Libertad 4, Taluma 5 y Superior 6; de sorgo dulce para

forraje, con la variedad Corpoica JTT-18 y de maíz, con la variedad Sikuaní V-10, y los híbridos H-108, H-111 y Corpoica Altillanura (primer híbrido de maíz QPM para suelos ácidos en Colombia) (Bernal et al. 2007; Narro et al. 2001; Valencia y Ligarreto 2010; Campuzano et al. 2014).

A diferencia de la yuca y el arroz que son más tolerantes al aluminio, el algodón tiene mayores restricciones para su adaptación. No obstante de existir escasos reportes de investigaciones en algodón relacionadas con la tolerancia al aluminio, investigaciones pioneras en Estados Unidos demostraron una respuesta diferencial favorable de algunas variedades en su crecimiento aéreo y volumen de raíces por efecto del enclamiento de un suelo en condiciones de acidez (Foy et al. 1976) y en Australia en suelos alcalinos en proceso de acidificación; así como en Mississippi y Alabama, se han realizado esfuerzos con resultados favorables en el desarrollo de genotipos asociados a esta condición (Odeh et al. 2012; Carreño y Chaparro 2013).

Las investigaciones pioneras de algodón en la altillanura, fueron iniciadas por Corpoica en el año 2004, con la introducción y evaluación de 140 genotipos de algodón; los resultados de cuatro años de investigación (2004-2008), permitieron reconocer una buena adaptación de esta especie en suelos con saturación de bases superior al 60 % y la identificación de un grupo de genotipos elite (Campuzano 2009). Por esta razón, se dio continuidad a esta investigación con el objetivo de evaluar cinco genotipos elite en suelos de sabanas ácidas mejoradas de la altillanura plana colombiana en el sistema productivo arroz-maíz-soya y derivar las ventajas comparativas y estrategias para la ampliación de la frontera de producción del algodón.

Materiales y métodos

Estructuración de la prueba de evaluación agronómica

Fueron evaluados cinco genotipos de algodón del Programa de Mejoramiento Genético de Algodón de Corpoica (Centro de Investigaciones Motilonia; municipio de Codazzi, departamento del Cesar), en cuatro localidades, durante los años 2007 y 2008, en el segundo semestre agrícola (siembra en agosto y cosecha en enero), mediante una prueba de evaluación agronómica (PEA) ajustada a

la Resolución del ICA 970 (10 marzo de 2010) (Colombia, 2010) con aplicación para la subregión de la Orinoquía, específicamente en la altillanura plana.

Genotipos y localidades de evaluación

La PEA estuvo constituida por cinco genotipos (dos variedades y tres líneas experimentales), seleccionados por el rendimiento y la calidad de fibra en ensayos durante los años 2004-2006, en las condiciones de la altillanura plana e identificados experimentalmente como V1: Corpoica M-123; V2: Línea Cesar 142-97 (LC 142); V3: Línea Cesar 149-00 (LC 149); V4: Línea Cesar 156-03 (LC 156) y V5: DP Acalá 90. Las localidades correspondieron a cuatro ambientes de evaluación ubicados en el departamento del Meta en tres municipios en el eje entre Villavicencio y Puerto Gaitán: Localidad 1 (LI): Villavicencio-Corpoica Libertad 2007 B; Localidad 2 (TA): Puerto Gaitán-Corpoica Taluma 2007 B; Localidad 3 (FS): Puerto López-Finca Santa Cruz 2007 B y Localidad 4 (FF): Puerto Gaitán-Finca Fazenda 2008 B.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA), con cinco tratamientos (dos variedades y tres líneas experimentales) y cuatro repeticiones. La unidad experimental se constituyó de ocho surcos de 4,0 metros de longitud con una separación entre estos de 0,80 m. No se incorporó un testigo comercial por ser una subregión nueva para el cultivo del algodón. Sin embargo, para efectos de medir la superioridad de los genotipos se tomó como referencia el rendimiento promedio de 1,7 kg algodón semilla en el piedemonte llanero durante los años 2007 y 2008 en el segundo semestre agrícola.

Características del suelo

Se registró la información de la historia de los lotes en cada localidad con base en la siguiente información: a) localización del lote, b) historia de lote (número de ciclos agrícolas desarrollados), c) dosis de enmiendas, y d) producción de los cultivos involucrados en los ciclos agrícolas. En cada lote se determinó el pH y los contenidos de materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio y saturación de bases (%) a tres profundidades (0 a 20, de 21 a 30 y de 31 a 40 cm).

Manejo agronómico

La preparación del suelo varió en cada localidad dependiendo de la historia del lote en relación con el número de ciclos de cultivos y las propiedades físicas del suelo. Se realizó una fertilización balanceada en kg/ha en cada localidad y experimento de N (140), P (80), K (80), S (1,2), B (0,5), Cu (0,5), Si (3,4) y Zn (3,0), aplicados en diferentes épocas y fraccionados: a) en la siembra, se aplicó todo el fósforo, una tercera parte del potasio y todos los elementos menores junto con el sulcamag; b) a los 15 días después de la emergencia (dde) del cultivo, se aplicó la tercera parte del potasio y el 40 % de la dosis de N; c) una tercera aplicación con el 30 % del N y una tercera parte del potasio fue realizada a los 30 dde y una cuarta fertilización se realizó a los 45 dde previo a la floración con el 30 % del N restante.

Para el componente sanitario respecto a insectos plaga, se realizó un monitoreo mensual de la entomofauna del cultivo (entomófagos y benéficos). Para el componente relacionado con patógenos, no se realizó aplicaciones de manejo químico con el propósito de reconocer el grado de resistencia del algodón en condiciones naturales de inóculo.

Evaluaciones agronómicas

A continuación se describen las variables agronómicas, reproductivas y productivas determinadas en campo: 1) altura de la planta (AP), determinada sobre el tallo principal, desde el nudo cotiledonal a la yema terminal de la planta y expresada en centímetros; 2) nudos por planta (NP), expresado en número; y 3) motas por planta (MP), expresado en número. En el momento de la cosecha se recogieron en cada unidad experimental, 50 motas tomadas al azar, para determinar las siguientes variables: 1) peso de mota (PM), expresado en gramos; 2) extracción de fibra (EF), determinada por la diferencia del peso total de la mota y el peso de semilla y material inerte, expresada en porcentaje; y 3) rendimiento algodón-semilla (RAS), determinado mediante la sumatoria de los pesos de los dos pases de la unidad experimental efectiva, expresada en kg/ha de algodón semilla.

En cada unidad experimental se tomó una muestra de 80 gramos de algodón fibra para evaluar las variables de calidad: micronaire o finura de la fibra (MN), como una medida de la finura y la madurez de la fibra con la siguiente clasificación: extra fina (valor menor a 3,0), fina (3,0-3,6), promedio (3,7-4,7), áspera (4,8-5,9)

y muy áspera (mayor de 5,9); longitud de fibra (LF), como la longitud media de la mitad compuesta por las fibras más largas, expresada en centésimas de pulgada y en milímetros y con la siguiente clasificación: fibra extra corta, corta, media, larga, y extra larga; índice de uniformidad de longitud de fibra (IULF), expresada en porcentaje y definida como la relación que existe entre la longitud media y la longitud media de la mitad superior de las fibras y con la siguiente clasificación: uniformidad muy baja (menor 77,0), baja (77,0 a 79,9), promedio (80,0 a 82,9), alta (83,0 a 85,0), y muy alta (mayor 85,0).

Análisis estadístico

Mediante el procedimiento estadístico Proc Univariate (SAS 9.3, 2003) y para las variables agronómicas, de rendimiento y calidad se determinó el cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza; los procedimientos y análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS, versión 9.3 (2003) con licencia para Corpoica número 70148300. Para establecer las diferencias entre medias se utilizó la prueba de Tukey ($p = 0,05$). Con la variable rendimiento se realizó el análisis de varianza (Anova) individual y combinado por localidades. Para el análisis de varianza, las localidades y las repeticiones se consideraron efectos aleatorios y, los genotipos, efectos fijos. El modelo matemático más adecuado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + (GA)_{ij} + B_{k(j)} + E_{ijk}$$

donde Y = variable de estudio; G_i = tratamiento (5 genotipos de algodón); A_j = ambientes (4 localidades); $(GA)_{ij}$ = interacción genotipo x ambiente; $B_{k(j)}$ = repeticiones (4) y E_{ijk} = error experimental.

El análisis de la interacción genotipo ambiente fue determinado utilizando tres métodos: a) estabilidad fenotípica de Eberhart y Russell (1966); b) índice de estabilidad determinado por el coeficiente de variabilidad (cv_i), propuesto por Francis y Kannenberg (1978); y c) índice de Lin y Binns (1988) utilizado como una medida única de la superioridad del comportamiento de un genotipo.

En el primero, la estabilidad de cada genotipo se describió por parámetros definidos en el siguiente modelo matemático: $Y_{ij} = X_{ij} + \beta_i X_j + d_{ij} + e_{ij}$; donde: Y_{ij} = promedio del i-ésimo tratamiento en el j-ésimo ambiente; X_{ij} = promedio del i-ésimo tratamiento sobre todos los ambientes; β_i = coeficiente de regresión lineal que mide la respuesta del i-ésimo tratamiento en los diferentes ambientes; X_j = índice del j-ésimo ambiente;

d_{ij} = desviación a partir de la línea de regresión correspondiente al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo ambiente; $y_{e_{ij}}$ = error asociado al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo ambiente según el modelo lineal aditivo.

El índice de estabilidad fue determinado por el coeficiente de variabilidad (cv_i) (Francis y Kannenberg 1978) y calculada mediante la siguiente fórmula: $cvi = \sqrt{CME/Y_{ij}} * 100$; donde CME = cuadrado medio del error y Y_{ij} = promedio de i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente.

El índice de superioridad de Lin y Binns (1988) se calculó mediante la fórmula: $P_i = \sum(X_{ij} - M_j)^2 / 2n$; donde P_i = índice de superioridad del i -ésimo genotipo; X_{ij} = rendimiento de algodón del i -ésimo genotipo en la j -ésima localidad; M_j = respuesta máxima obtenida entre todos los genotipos en la j -ésima localidad; n = número de localidades.

Selección del genotipo estable

El criterio para la selección del genotipo con mayor estabilidad fenotípica se basó en el menor valor del coeficiente de variabilidad (cv), la menor desviación de la regresión ($S2di$) e índice de superioridad y una media del rendimiento de algodón alto, superior al promedio registrado en el piedemonte usado como referencia comercial (1,7 t/ha de algodón de algodón semilla). Las anteriores características asociadas a la calidad de fibra

de media a larga, determinaron la selección del genotipo como candidato a variedad comercial para la altillanura.

Costos de producción

Se determinaron los costos directos e indirectos de producción por hectárea y tonelada de algodón semilla en la altillanura, con base en las actividades de campo y precios en las pruebas de evaluación agronómica durante el ciclo agrícola 2007-2008. Como valor de comparación se tomaron los costos de producción del algodón en la costa Caribe durante el mismo ciclo agrícola.

Resultados y discusión

Características de las localidades de evaluación

Los lotes utilizados fueron seleccionados por tener indicadores de sabanas ácidas mejoradas con una incorporación de 2,6 a 3,5 t/ha de cal y una rotación de cultivos maíz-soya de 1,5 a 2,0 años. El resultado de este mejoramiento del suelo se observa por el nivel de saturación de bases del 80,9% en los primeros 20 cm del suelo asociado con un alto contenido de materia orgánica y fósforo. El indicador productivo de esta condición se observa en la última cosecha del cultivo en rotación con rendimientos que oscilaron para el maíz entre 5,6 y 7,2 t/ha y la soya de 1,9 a 2,1 t/ha (tablas 1 y 2).

Tabla 1. Ciclo agrícola, secuencia de la rotación de cultivos, encalamiento y productividad de cuatro lotes en la altillanura plana colombiana, 2007-2008

Localidad	Ciclo agrícola años	Secuencia de la rotación	Encalamiento total t/ha	Rendimiento t/ha
Villavicencio (LI)	2,0	M-S-M-S	2,6	Maíz: 5,6 Soya: 2,1
Puerto Gaitán (TA)	1,5	M-S-M	3,0	Maíz: 6,5 Soya: 1,9
Puerto López (FS)	1,5	M-S-M	3,5	Maíz: 5,5 Soya: 1,9
Puerto Gaitán (FF)	2,0	M-S-M-S	3,5	Maíz: 7,2 Soya: 1,9

Localidades: LI (Corpoica Libertad, 2007 B); TA (Corpoica Taluma, 2007 B); FS (Finca Santa Cruz, 2007 B); FF (Finca Fazenda, 2008 B); Secuencia de la rotación: M = maíz, S = soya
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Análisis físico químico al final del ciclo agrícola en cuatro lotes en la altillanura, 2007-2008

Profundidad cm	pH	MO %	P ppm	Ca Mg K meq/100 g de suelo			Saturación bases %
0-20	5,4	2,6	18	1,40	0,23	0,22	80,9
20-30	5,0	2,1	3	0,47	0,14	0,06	38,7
30-40	4,8	1,3	1	0,22	0,07	0,04	19,6

Fuente: Elaboración propia

Análisis de las variables de crecimiento y componentes del rendimiento

El análisis de varianza para las variables nudo por planta (NP), altura de planta (AP), motas por planta (MP) y peso de mota (PM) no detectó diferencias estadísticas para la interacción genotipo por localidad. Esto indica que

los efectos simples de los factores genotipo y localidad, especialmente este último, fueron los más determinantes en la respuesta. Para el caso del factor localidad o ambiente, esta fue altamente significativa ($p \leq 0,01$) en todas las variables mencionadas y el factor de genotipo significativo solo para NP y PM (tabla 3).

Tabla 3. Cuadrados medios del Anova combinado de localidades. Corpoica 2007-2008

Fuente de variación	gl	RAS	NP	AP	MP	PM
Localidad (L)	3	2.208.960**	38,01**	2.181,51**	561,91**	6.497,59 **
R (L)	12	14.738	3,48	327,21	11,68	1.16,93
Genotipo (G)	4	496.123*	6,13*	88,53 ns	5,38 ns	1.187,96 *
G x L	12	201.284 ns	1,48 ns	52,10 ns	5,99 ns	434,42 ns
Error	48	66.648	1,16	38,84	4,80	216,61
CV (%)		11,9	6,1	7,8	14,9	5,8

* = nivel de significancia al 0,05; ** = nivel de significancia al 0,01; CV = coeficiente de variación. Rendimiento de algodón semilla: RAS; nudos por planta: NP; altura de planta: AP; motas por planta: MP; y peso de mota: PM.

Fuente: Elaboración propia

El factor localidad fue el que permitió reconocer las diferencias de las variables NP, AP, MP y PM en la zona de estudio. Los promedios para NP oscilaron entre 15,9 a 18, 9 nudos por planta para las localidades FF y FS; con una altura de planta entre 71,7 y 93,9 cm para las localidades FS y FF; y un número de motas por planta de 10,8 y 22,1 para las localidades LI y FF; con un peso

de la mota entre 231,3 y 275,2 g para las localidades FF y LI, respectivamente (tabla 4). Se destaca el tamaño de la planta de algodón que no llegó a sobrepasar el metro de altura; esto indica que no es necesario realizar la aplicación de un controlador de crecimiento, lo que lo constituye en un factor económico y ambiental, por reducción de insumos para la producción.

Tabla 4. Medias de localidades para nudos por planta (NP), altura de planta (AP), motas por planta (MP), peso de mota (PM). Corpoica 2007-2008

Localidad	NP	AP	MP	PM
Villavicencio (LI)	17,7	78,3	10,8	275,2
Puerto Gaitán (TA)	18,7	72,7	11,3	253,4
Puerto López (FS)	18,9	71,7	13,0	249,4
Puerto Gaitán (FF)	15,9	93,9	22,1	231,3
Promedio	17,8	79,2	14,3	252,3
DMS (0,05)	3,6	12,7	7,9	27,9
CV (%)	6,7	8,3	9,7	10,1

Localidad: LI (Corpoica Libertad, 2007 B); TA (Corpoica Taluma, 2007 B); FS (Finca Santa Cruz, 2007 B); FF (Finca Fazenda, 2008 B); CV = coeficiente de variación.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de estabilidad fenotípica

El análisis de varianza, combinando localidades para el rendimiento de algodón semilla (RAS) (tabla 3), no presentó diferencias estadísticas para la interacción genotipo x localidad. Esto permite afirmar que los efectos de los factores individuales de manera independiente genotipo y localidad fueron significativos y determinantes para explicar las diferencias en el modelo estadístico para esta variable y que los materiales genéticos no

presentaron interacción genotipo x ambiente, considerándose todos con adaptación general.

El rendimiento de algodón semilla por genotipo a través de las cuatro localidades presentó un promedio de 2.160 kg/ha con valores que oscilaron entre 1.951 kg/ha para el genotipo LC-149 y 2.427 kg/ha para el genotipo LC-142. El promedio de RAS por localidad osciló entre 1.583 kg/ha para la localidad (FS) (Puerto Gaitán, Finca Santacruz) y 2.578 kg/ha para la localidad (LI) (Villavicencio, Corpoica CI Libertad) (tabla 5).

Tabla 5. Rendimiento promedio de algodón semilla por localidad de cinco genotipos en la altillanura colombiana. Corpoica 2007-2008

Genotipo/localidad	Villavicencio (LI)	Puerto Gaitán (TA)	Puerto López (FS)	Puerto Gaitán (FF)
LC-142	3.117,8	2.424,3	1.887,3	2.280,8
LC-149	2.141,8	1.825,3	1.628,3	2.211,8
LC-156	2.333,0	2.171,0	1.810,5	2.535,3
Corpoica M-123	2.123,0	2.151,5	1.617,8	2.583,3
Acala 90	2.578,5	2.086,8	1.583,0	2.118,5
Promedio localidad	2.458,8	2.131,7	1.705,3	2.345,9
DMS (0,05)	220,8	599,0	278,9	530,8
CV (%)	9,7	10,3	7,9	10,8

Localidad: LI (Corpoica Libertad, 2007 B); TA (Corpoica Taluma, 2007 B); FS (Finca Santa Cruz, 2007 B); FF (Finca Fazenda, 2008 B). CV = coeficiente de variación.

Fuente: Elaboración propia

No obstante de no tener una interacción genotipo x ambiente, se aprovechó el análisis de los tres parámetros de estabilidad utilizados para identificar el genotipo LC 156 por presentar una combinación favorable de rendimiento y parámetros de estabilidad: rendimiento

alto de 2.212 kg/ha, un coeficiente de regresión estadísticamente igual a uno con la menor desviación de regresión y coeficiente de variación (S^2d_i y cv_i) y el segundo mejor índice de superioridad (IP) (tabla 6).

Tabla 6. Parámetros de estabilidad fenotípica de cuatro genotipos de algodón evaluados en cuatro localidades en la altillanura. Corpoica 2007-2008

Genotipo	U_i	b_i	S^2d_i	cv_i	IP
LC-142	2.427,5 a	0,92	80,73 ns	14,81	3,84
LC-149	1.951,7 b	1,03	65,74 ns	11,73	5,27
LC-156	2.212,4 ab	1,02	46,41 ns	3,55	4,30
Corpoica M-123	2.118,8 ab	1,03	45,89 ns	4,27	4,31
Acala 90	2.091,6 ab	0,91	86,35 ns	13,60	4,52

Medias con la misma letra son iguales estadísticamente ($p = 0,05$); ns = no significativo; U_i = media de rendimiento; b_i = coeficiente de regresión; S^2d_i = desviaciones estándar de la regresión; cv_i = coeficiente de variabilidad; IP = índice de superioridad.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de calidad de fibra

El análisis de varianza para las variables de calidad de fibra EF, MN, LF y IULF no detectó diferencias estadísticas para la interacción genotipo x localidad. Esto indica que los efectos simples de los factores

genotipo y localidad, fueron los determinantes en la respuesta. Para el caso del factor localidad o ambiente, esta fue altamente significativa ($p \leq 0,01$) para todas las variables mencionadas y el factor de genotipo significativo para todas con excepción de LF (tabla 7).

Tabla 7. Cuadrados medios del Anova combinado de localidades. Corpoica 2007-2008

Fuente de variación	gl	EF	MN	LF	IULF
Localidad (L)	3	979,61**	4,16 *	3,89 *	5,78 *
R (L)	12	0,97	3,48	2,27	3,36
Genotipo (G)	4	8,60*	6,13*	4,78 ns	6,29 *
G x L	12	5,32 ns	1,48 ns	1,23 ns	1,36 ns
Error	48	1,35	1,16	1,18	1,17
CV (%)		2,2	6,1	7,4	12,6

EF: extracción de fibra; MN: micronaire; LF: longitud de fibra; IULF: índice de uniformidad de longitud de fibra. Diferencias estadísticas *: significativas y **: altamente significativas; CV = coeficiente de variación.

Fuente: Elaboración propia

En el factor localidades, la extracción de fibra osciló entre 41,3 a 46,3 para las localidades FF y TA, respectivamente; con un micronaire de 4,18 a 4,26 en las localidades LI y FF; una longitud de fibra entre 1,11 y 1,13 en las localidades FF y FS; y un índice de uniformidad de fibra entre 82,03 a 83,20 en las localidades LI y FF, respectivamente (tabla 8). La calidad del algodón por efecto del genotipo, mostró

un porcentaje de extracción de fibra entre 40,9 a 42,6 para los genotipos LC-156 y LC-142, respectivamente, considerado en ambos genotipos como alto. En relación con el micronaire los valores oscilaron entre 3,86 en LC-149 y 4,21 para LC-156, con una calificación de promedio y media-larga para el primer y segundo genotipo, respectivamente (tabla 9).

Tabla 8. Medias de localidades para las variables de calidad de fibra de algodón. Corpoica 2007-2008

Localidad	EF	MN	LF	IULF
Villavicencio (LI)	42,1 ab	4,18 b	1,12 a	82,03 a
Puerto Gaitán (TA)	46,3 a	4,23 a	1,13 a	83,20 a
Puerto López (FS)	45,7 a	4,21 a	1,13 a	82,54 a
Puerto Gaitán (FF)	41,3 ab	4,26 ab	1,11 a	83,20 a

Medias con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales con $p < 0,05$ (Tukey). EF: extracción de fibra; MN: micronaire (MN); LF: longitud de fibra; IULF: índice de uniformidad de longitud de fibra. Localidad: LI (Corpoica Libertad, 2007 B); TA (Corpoica Taluma, 2007 B); FS (Finca Santa Cruz, 2007 B); FF (Finca Fazenda, 2008 B).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Medias de genotipos para las variables de calidad de fibra de algodón. Corpoica 2007-2008. (Laboratorio de Calidad de Fibras, Medellín)

Genotipos	EF	MN	LF	IU
LC-142	42,6 a	4,21 a	1,12 a	82,03 a
LC-149	41,7 ab	3,86 a	1,13 a	81,82 a
LC-156	40,9 b	4,21 a	1,14 a	83,81 a
Corpoica M-123	41,2 ab	4,32 a	1,11 a	82,53 a
Acala 90	42,4 ab	4,24 a	1,11 a	83,20 a

Medias con la misma letra en sentido vertical son estadísticamente iguales con $p < 0,05$ (Tukey). EF: extracción de fibra; MN: micronaire; LF: longitud de fibra; IU: índice de uniformidad (IU). Localidad: LI (Corpoica Libertad, 2007 B); TA (Corpoica Taluma, 2007 B); FS (Finca Santa Cruz, 2007 B); FF (Finca Fazenda, 2008 B).

Fuente: Elaboración propia

El valor de extracción y la longitud de la fibra de algodón obtenida en las cuatro localidades y en los genotipos de algodón estudiados reflejan la oportunidad que tiene la altillanura para la producción comercial con una

calidad excelente en relación con extracción de fibra, longitud tipo media a larga y un micronaire tipo promedio, atributos que lo hacen atractivo para un mercado de exportación.

Población de insectos plaga y benéficos

Se encontraron cuatro especies de insectos de importancia económica en el algodón: 1) *Spodoptera ornithogalli* a los 15 días después de la emergencia (dde) actuando como trozador de la base del tallo; 2) *Spodoptera* sp. como bellotero en la etapa de floración y llenado de capsula;

3) *Alabama argillacea* como comedor de hojas principalmente en el tercio medio y superior a los 50 dde y 4) *Bemisia tabaci* como chupador a los 80 dde (tabla 10). Sobresalió la ausencia del picudo *Anthonomus grandis*, el insecto plaga del algodón de mayor daño económico en el país.

Tabla 10. Insectos potencialmente plaga para el algodón en la altillanura plana colombiana. Corpoica 2007-2008

Nombre común	Nombre científico	Época de aparición	Daño	Importancia
Cogollero	<i>Spodoptera ornithogalli</i>	15 dde	Trozador de la base del tallo	Ocasional plaga potencial
Cogollero del maíz	<i>Spodoptera frugiperda</i>	Floración y llenado capsula	Bellotero	Plaga potencial
Defoliador del algodón	<i>Alabama argillacea</i>	50 dde	Hojas: tercio medio y superior	Plaga potencial
Mosca blanca	<i>Bemisia tabaci</i>	80 dde	Chupador	Plaga potencial

dde = días después de la emergencia

Fuente: Elaboración propia

No obstante de la presencia de insectos plaga de interés económico, se observó una población de insectos benéficos actuando como depredadores de huevos y larvas y parásitos de larva de *Spodoptera* sp. (tabla 11). Esta situación podría estar relacionada con el modelo

comercial de manejo integrado del sistema maíz-soya basado en control biológico que favorece la presencia de poblaciones nativas benéficas, que se constituiría en una ventaja comparativa como región potencial para la producción de algodón bajo un modelo ambientalmente sostenible.

Tabla 11. Insectos benéficos y controladores de insectos plaga en el algodón en la altillanura plana colombiana. Corpoica 2007-2008

Nombre vulgar	Nombre científico	Controlador de:
Mariquitas	<i>Coleomegilla</i> sp. <i>Cycloneda</i> sp.	Depredador de larvas de lepidópteros
Parásito	<i>Euplectrus</i> sp.	Parásito de larvas de <i>Spodoptera</i> sp.
Arañas	Arácnidos	Depredador
Avispas	<i>Polistes</i> spp.	Depredador de larvas de <i>S. frugiperda</i> , <i>S. ornithogalli</i> , <i>A. argillacea</i> .
Crisopa	<i>Crisopa</i> spp.	Depredador de huevos y larvas de <i>S. frugiperda</i> , <i>S. ornithogalli</i> , <i>A. argillacea</i>

Fuente: Elaboración propia

Costos de producción

Los costos de producción (CP) de algodón semilla de Corpoica Menegua en la altillanura fueron menores en un 33,19% (CP = \$2.207.500 y rendimiento = 2.212 kg/ha) a los valores tomados como referente en la costa Caribe (CP = \$3.304.438 y rendimiento = 2.090 kg/ha). Los

tres rubros con mayor diferenciación fueron: el valor de la tierra, las aplicaciones químicas para el control de insectos plaga y las enfermedades y el control de altura de la planta. El costo por tonelada de algodón semilla en la altillanura fue de \$997.965, menor en un 47,6%, es decir \$906.732 en relación con el de la costa Caribe con un valor de \$1.904.697 (tabla 12).

Tabla 12. Costos de producción de algodón semilla en la costa Caribe para un mediano productor (ciclo 2007-2008) y el escenario probable en la altillanura plana colombiana con la variedad Corpoica Menegua (pesos de 2008)

Rubro	Costa Caribe	Altillanura
Tierra	388.381	150.000
Preparación suelos	66.822	60.000
Siembra	479.408	207.500
Riegos y drenajes	78.284	0
Control de malezas	330.536	330.000
Abonamiento	485.087	480.000
Manejo de plagas	395.168	0
Manejo de enfermedades	39.562	0
Regulación de altura	51.857	0
Recolección	547.653	540.000
Destrucción de socas	59.657	60.000
Asistencia técnica	57.258	60.000
Costos indirectos	105.305	100.000
Costos financieros	219.460	220.000
Costo de producción por hectárea	3.304.438	2.207.500
Rendimiento algodón semilla (kg/ha)	2.090	2.212
Costo producción por tonelada (\$/t)	1.904.697	997.965

Fuente: Elaboración propia

Colombia fue un país exportador por excelencia de algodón durante 31 años consecutivos (1959-1992) con autoabastecimiento de su demanda interna. A partir del año 1959 inició con su primera exportación significativa de 1.003 toneladas y, de este año hasta 1992, logró satisfacer su demanda interna con exportaciones adicionales significativas; el registro de su última exportación en el año 1992 fue de 41.253 toneladas. Desde 1993 y por un período de 20 años redujo las exportaciones en un 95 % y las importaciones se han mantenido en un promedio de 30.000 t/año (Confederación Colombiana del Algodón c2012).

La ventaja comparativa de la altillanura plana colombiana para este producto es el rendimiento de algodón semilla superior al promedio nacional con una notable reducción del 33,2 % en relación con los de la Costa Caribe, por el menor valor de la tierra y la ausencia de control químico para insectos plaga y enfermedades y regulador de altura. Estos factores productivos y económicos asociados a la ausencia del insecto plaga de mayor importancia económica en Colombia, el picudo, y la presencia de una población benéfica de insectos controladores se constituyen en una oportunidad para la cadena de valor del algodón en el país. La principal condición necesaria para la siembra de algodón en la altillanura es un suelo mejorado con una saturación de base superior al 80 % y con tres años de rotación maíz-soya.

Por su posición privilegiada, el país cuenta con dos cosechas anuales, la producción de la región costa Caribe durante el primer semestre, que representa el 78 % de la producción nacional y la de la región interior que representa el 22 % restante, producida durante el segundo semestre del año. Estos resultados permiten postular a las sabanas ácidas mejoradas de la altillanura como una zona importante para incorporar en la producción de la región interior con algodón óptimo para exportación y con aplicación en los procesos de hilatura de anillo y tejeduría de punto conocido como *Open End*.

Conclusiones

El desarrollo de una prueba de evaluación agronómica de cuatro genotipos de algodón permitió identificar el genotipo L-156 como candidato a variedad comercial con recomendación para siembra en la altillanura plana colombiana, el cual fue inscrito y registrado en el Sistema Nacional de Cultivares del ICA como Corpoica Menegua. Esta presentó los mejores atributos requeridos para una variedad comercial por presentar una estabilidad fenotípica amplia o general asociada a un rendimiento promedio de 2,1 t/ha de algodón semilla, 1,5 t/ha de algodón tipo fibra media a larga, un porcentaje de extracción de fibra de 40,9 % y micronaire tipo promedio con un alto índice de uniformidad de la fibra (1,14).

Se identificaron tres atributos que confieren ventaja comparativa de la altillanura plana colombiana para el algodón: reducción del 33,19 % de los costos de producción en relación con los de la costa Caribe; ausencia del insecto plaga de mayor daño económico en el país (*Anthonomus grandis* B.) y regulación fisiológica natural de altura de planta que no requiere del uso de controladores de crecimiento. La presencia de una población benéfica de insectos controladores de los insectos plaga encontrados en la altillanura para el algodón se constituyen en una oportunidad para la producción de algodón con criterios de sostenibilidad para el país. Se establece como condición *sine qua non* para la siembra de algodón en la altillanura que el suelo presente una saturación de base superior al 80 % con tres años de cultivo con la rotación maíz-soya.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al apoyo económico del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia y a Conalgodón. Se hace un reconocimiento a los investigadores Jaime Bernal, Ruby Hernández y Alejandro Navas por haber realizado los primeros estudios para conocer la adaptación y el comportamiento del algodón en la altillanura y Ángel Mendoza quien proveyó los genotipos de algodón con tolerancia a aluminio.

Referencias

- Adams F, Moore BL. 1983. Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal plain. *Soil Sci Soc Am J.* 47(1):99-102.
- Amézquita E, Rao IM, Rivera M, Corrales II, Bernal JH. 2013. Sistemas agropastoriles. Un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Cali: CIAT, MADR, Corpoica.
- Bernal JH, Caicedo S, Guevara EJ. 2007. Híbridos de maíz amarillo adaptados a suelos ácidos de la altillanura plana colombiana. Corpoica; [consultado 2015 febrero]. <http://corpomail.corpoica.org.co/BACFILES/BACDIGITAL/59441/59441.pdf>.
- Camacho-Tamayo JH, Luengas CA, Leiva FR. 2008. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia. *Chilean J Agric Res.* 68:(1):42-55.
- Campuzano LF. 2009. Plan Nacional para mejorar la competitividad y sostenibilidad del Sistema de Producción del Algodón en Colombia. Nuevas variedades y tecnologías para el manejo del algodón en Colombia. Informe final técnico Convenio Corpoica-Ministerio de Agricultura-Conalgodón. Bogotá: Corpoica.
- Campuzano LF, Caicedo S, Narro L, Alfonso H. 2014. Corpoica H5: primer híbrido de maíz amarillo de alta calidad de proteína (QPM) para la altillanura plana colombiana. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu.* 15(2):173-182.
- Carreño A, Chaparro-Giraldo A. 2013. Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Univ Sci.* 18(3):283-310.
- Caudle N. 1991. Groundworks 1. Managing soil acidity. Raleigh: North Caroline State University-TropSoils.
- Ceballos H, Pandey S, Knapp EB, Duque J. 1995. Progress from selection for tolerance to soil acidity in five tropical maize populations. En: Date RA, Grundon NJ, Rayment GE, Probert ME, editores. *Plant-soil interaction at low pH: Principles and management.* Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. pp. 419-424.
- Colombia, Instituto Colombiano Agropecuario. Resolución ICA 970. Por medio de la cual se establecen los requisitos para la producción, acondicionamiento, importación, exportación, almacenamiento, comercialización y/o uso de semillas en el país, su control y se dictan otras disposiciones. 10 de marzo de 2010; [consultado 2012 may]. <http://www.ica.gov.co/getattachment/03750a73-db84-4f33-9568-6e0bad0a507d/200R970.aspx>.
- Comité Consultivo Internacional del Algodón. 2012. Algodón: Revista de la situación mundial. *Revista ICAC.* 65(5):1-22.
- Confederación Colombiana del Algodón. c2012. Área, rendimiento y producción 2014. Conalgodón; [consultado 2015 may]. www.conalgodon.com/estadisticas-rendimiento-y-produccion
- Delhaize E, Ryan PR. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiol.* 107(2):315-321.
- Duque-Vargas J, Pandey S, Granados G, Ceballos H, Knapp E. 1994. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Sci.* 34(1):50-54.
- Eberhart SA, Russell WA. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6(1):36-40.
- OCDE-FAO. 2011. *Perspectivas agrícolas 2011-2020.* París: OECD Publishing; [consultado 2015 feb]. http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2011-es.
- Foy CD. 1976. General principles involved in screening plants from aluminium and manganese tolerance. En: Wright MJ, Ferrari AS, editores. *Plant Adaptation to mineral stress in problem soils.* Ithaca: Cornell Univ. Press. pp. 255-267.
- Foy CD, Chaney RL, White MC. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu Rev Plant Physiol.* 29:511-566.
- Francis TR, Kanneberg LW. 1978. Yield stability studies in short-season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can J Plant Sci.* 58(4):1029-1034.
- Granados G, Pandey S, Ceballos H. 1993. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. *Crop Sci.* 33(5):936-940.
- Kochian L, Hoekenga O, Pineros M. 2004. How do plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Ann Rev Plant Biol.* 55:459-493.
- Lin CS, Binns MR. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can J Plant Sci.* 68:193-198.
- Malagón D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev Acad Colomb Cienc.* 27(104):319-341.
- Narro LA, Pandey S, De León C, Salazar F, Arias MP. 2001. Implications of soil-acidity tolerant maize cultivars to increase production in developing countries. En: Ae N, Arihara J, Okada K, Srinivasan A, editores. *Plant nutrient acquisition. New perspectives.* Tokio: Nias-Springer. pp. 447-463.
- Nicholaides III, Piha M. 1987. A new methodology to select cultivars tolerant to aluminium and with high yield potential. En: CIAT. *Workshop on evaluating sorghum for tolerance to Al-toxic tropical soils in Latin America.* Cali: CIAT.
- Pandey S, Ceballos H, Magnavaca R, Bahia AFC, Duque-Vargas J, Vinasco LE. 1994. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Sci.* 34(6):1511-1514.
- Rout GR, Samantaray S, Das P. 2001. Aluminum toxicity in plants: a review. *Agronomie.* 21(1):3-21.
- Odeh I, McBratney A, Singh O. 2012. Buffering capacity and acidification rates of cotton soils from northern NSW. Sídney: Australian Cotton CRC Department of Agricultural Chemistry & Soil Science. The University of Sydney Report.
- Valencia RA. 2006. Variedades de soya de importancia económica para la Orinoquía colombiana. En: García E, López MT, Valencia RA, Garzón V, Navas GE, Salamanca CR, Caicedo S, Almanza EF, Bernal JH, Guevara EJ, et al. *Soya (Glycine max (L.) Merrill) Alternativa para los sistemas de producción de la Orinoquía colombiana. Manual Técnico 9.* Bogotá: Corpoica. pp. 73-84.
- Valencia R, Ligarreto GA. 2010. Mejoramiento genético de la soya (*Glycine max* [L.] Merrill) para su cultivo en la altillanura colombiana: una visión conceptual prospectiva. *Agron Colomb.* 28(2):155-163.
- Von Uexküll H, Mutert E. 1995. Global extend development and economic impacts of acid soils. *Plant and Soil.* 171:1-15.