

Mejoramiento genético de la soya (*Glycine max* [L.] Merrill) para su cultivo en la altillanura colombiana: una visión conceptual prospectiva

Soybean breeding (*Glycine max* [L.] Merrill) for the Colombian Altillanura: a prospective and conceptual view

Rubén A. Valencia R.^{1,3} y Gustavo A. Ligarreto M.²

RESUMEN

La soya es materia prima esencial para la elaboración de concentrados balanceados para la alimentación animal, en particular para la cadena avícola y porcícola. En cuanto a su cultivo, constituye una alternativa de rotación en el trópico bajo. La producción nacional de soya cubre un bajo porcentaje de la demanda nacional, lo cual implica altos volúmenes de importación. En Colombia la producción nacional depende en su mayoría de la variedad Soyica P-34, la superación de cuyas limitaciones de producción hace necesario generar nuevas alternativas que ofrezcan ventajas comparativas. La Altillanura colombiana, caracterizada por tener suelos ácidos saturados en aluminio, presenta un alto potencial para la producción competitiva de soya. Por ello, los programas de mejoramiento genético de este grano deben hacer énfasis en su calidad, adaptación específica, tolerancia a enfermedades y alto rendimiento. En este contexto, el presente trabajo desarrolla una visión prospectiva de los principales avances en el mejoramiento genético de la soya para la altillanura colombiana.

Palabras clave: tolerancia al aluminio, métodos de selección, variedades.

ABSTRACT

Soybean is an essential raw material in the manufacture of balanced concentrates for animal feeding, particularly for the avian and swine production chains. In addition, it constitutes a rotation alternative for low altitude tropical regions. The national soybean production covers a low percentage of the national demand, which implies high import volumes. This production system depends mostly of the variety Soyica P-34, whose limitations make it necessary to generate new alternatives with comparative advantages. Despite its aluminum saturated acid soils, the Colombian eastern high plains (the Altillanura) has a strong potential for the competitive production of soybean. For these reasons, breeding programs should emphasize specific adaptation, disease tolerance, high yield, and good quality grain. Hence, the purpose of this paper, framed in a prospective vision, has been to document the main developments in soybean breeding for the Altillanura region.

Key words: aluminum tolerance, selection methods, varieties.

Introducción

El incremento creciente en la demanda de alimentos alrededor del mundo es un gran reto para los genetistas en busca de plantas de alto potencial genético que mejoren la productividad de los suelos con limitaciones y que puedan ser vinculadas en sistemas agrícolas sostenibles. En Suramérica, aproximadamente 250 millones de hectáreas en sabanas tropicales presentan problemas de toxicidad de aluminio (Vera, 2000). Sus suelos son comúnmente oxisoles, tienen baja capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica tiende a ser baja (Borkert y Sfredo, 1995), factores altamente limitantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Bianchi *et al.*, 2000). Sin embargo, investigaciones realizadas en Colombia por ICA, CIAT y

Corpoica han permitido avances significativos en materia de recursos genéticos con adaptación específica y recomendaciones técnicas para la producción (Valencia y Leal, 2004), que han permitido mejorar el potencial productivo de estas sabanas. La soya ha sido una de las especies de alta relevancia en estos estudios como cultivo fundamental de los esquemas rotacionales de los sistemas de producción.

La soya es originaria del norte y centro de China, con latitudes cercanas a 40° N. La expansión a gran escala de la soya se efectuó en la cuarta década del siglo XX en Estados Unidos, nación que desde 1954 lidera la producción mundial (Ridner, 2006). Aunque la soya es reconocida como un cultivo sensible al fotoperiodo y adaptada a latitudes templadas (14-16 h de luz), por mejora genética ha sido

Fecha de recepción: 18 de febrero de 2010. Aceptado para publicación: 28 de julio de 2010

¹ Centro de Investigación La Libertad, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Villavicencio (Colombia).

² Departamento de Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia).

³ Autor de correspondencia. rvalencia@corpoica.org.co

posible incorporar genes de adaptación en variedades para cultivo en el trópico, lo que ha permitido aumentar el área de siembra al superar el limitante del fotoperiodo (Alezones y Zocco, 2007).

El área mundial de soya en el año 2007, según la FAO (2009), fue de 90,2 millones de hectáreas, para una producción global de 220,5 millones de toneladas y un rendimiento promedio de grano de 2,4 t ha⁻¹. Estados Unidos, con 33% de la producción total, ocupa el primer lugar, seguido por Brasil con 26,2% y luego Argentina con 21,5%. Colombia solo alcanza a producir cerca del 0,023% del total mundial (Tab. 1). En el mercado internacional, el mayor importador es China, con 34 millones de toneladas, seguido por la Unión Europea con 15,45 millones, Japón 4,15 millones y México con 3,95 millones de toneladas (USDA, 2007).

TABLA 1. Área, producción y rendimiento de los principales productores de soya, en el mundo y Colombia. 2007.

País	Área (miles ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Estados Unidos	25.900,0	72.860.400	2,80
Brasil	20.565,3	57.857.200	2,80
Argentina	15.981,3	47.482.784	2,97
China	8.900,0	13.800.147	1,55
India	8.880,0	10.968.000	1,24
Paraguay	2.429,0	5.856.000	2,41
Canadá	1.171,5	2.695.700	2,30
Colombia	23,0	51.471	2,20
Total global	90.199,63	220.532.612	2,44

Fuente: Faostat (2009).

El cultivo de la soya es el sexto cultivo con mayor producción en el mundo, superado sólo por la caña de azúcar, el maíz, el trigo, el arroz y la papa. La importancia de este cultivo radica en su alto contenido de proteína (35-40%) y grasa (18-22%), con una alta proporción de ácidos grasos insaturados y de aminoácidos esenciales adecuados para la alimentación humana y animal.

Limitantes y oportunidades de la producción de soya en la altillanura colombiana

Colombia, a pesar de tener condiciones agroecológicas ideales para la producción de soya, importa cerca del 93% de sus necesidades, que se aproxima al millón de toneladas anuales. Los bajos rendimientos de grano y los altos costos de producción son los dos elementos que coexisten para que el panorama de la producción de soya en el país sea desalentador, y se requiera importar el fríjol soya anualmente (MADR, 2008) para suplir las necesidades internas.

Las importaciones de soya en 2007 fueron de 332.064 t de grano y 810.605 t de torta (FAO, 2009).

Los altos costos de producción de soya en el departamento del Valle del Cauca, representados principalmente en los rubros del costo de la tierra y el riego complementario, han convertido al departamento del Meta en el mayor productor del grano en Colombia por sus ventajas comparativas, al aportar cerca del 76,1% de la producción nacional (MADR, 2005); sin embargo, los rendimientos promedios de soya comercial son aun bajos comparativamente con otros países suramericanos. Al analizar la base de datos Agronet (2009), el rendimiento de grano de soya en Colombia ha presentado variaciones en su historia, con valores cercanos a las 2,0 t ha⁻¹, un promedio máximo con 2,4 t ha⁻¹ en el año 2001 y un mínimo de 1,5 t ha⁻¹ en 2005. En promedio, el rendimiento de grano de la cosecha de 2008 (2,1 t ha⁻¹) estuvo por debajo del promedio internacional (2,44 t ha⁻¹). De igual manera, la reducción del área de siembra ha variado en los últimos 20 años en Colombia, pasando de 116.150 hectáreas en 1990, a 26.344 ha en 2008, con una producción de 55.950 t.

Los Llanos Orientales de Colombia representan cerca del 23% del área del territorio nacional. En esta región, las vegas del piedemonte y la altillanura plana presentan condiciones ideales para la producción de soya; sin embargo, por su área y ventajas comparativas –como el bajo costo de la tierra, fácilmente mecanizable, no riego complementario, cercanía a los centros de consumo e importantes vías fluviales para la comercialización (Corpoica, 2009), entre otros–, la altillanura es el agroecosistema por excelencia para la producción competitiva y sostenible de la soya en Colombia. La altillanura plana, con una altitud de 150 a 200 msnm, está contenida en una franja que se extiende al sur del río Meta desde el municipio de Puerto López hasta el límite con Venezuela. Sus suelos, especialmente oxisoles (Tropeptic Haplustox isohipertérmico), tienen en promedio un pH de 4,5, baja disponibilidad de Ca, Mg, K, P, una saturación de aluminio mayor de 65% y son susceptibles a la degradación. La temperatura media de la zona es de 28°C, con una precipitación anual de 2.200 mm y una evapotranspiración potencial de 1.300 mm. La época lluviosa de forma monomodal va de abril a noviembre, y el periodo seco se extiende entre diciembre y marzo (Amézquita, 1998; Molina *et al.*, 2003). De esta franja, el área potencial para la producción de soya supera las 560.000 ha, donde se presentan las mayores ventajas para la producción. Los avances ya se hacen notorios en el área de siembra, que pasó de 57 ha en 2000 a más de 4.000 ha en 2007 (Tab. 2), con altibajos ocasionados por problemas de mercado.

Sin embargo, la proyección es favorable por el actual auge inversionista que se presenta en la región.

TABLA 2. Evolución del área de siembra de soya en la altillanura colombiana (2000-2009).

Año	Semestre A	Semestre B	Total
2000	0	57	57
2001	50	630	680
2002	175	1.625	1.800
2003	1.290	2.890	4.180
2004	3.495	6.150	9.645
2005	2.170	3.100	5.270
2006	2.100	3.636	5.736
2007	1.005	3.050	4.055
2008	3.250	6.415	9.665
2009	5.953	6.481	12.434

Fuente: Cadena Regional Avícola-Porcícola, Secretaría de Agricultura del Meta y Corpoica, C.I. La Libertad (2009).

El aprovechamiento efectivo de este agroecosistema actual y futuro ha sido posible a través de la generación y aplicación de tecnologías apropiadas para la producción sostenible, donde prima la adaptación específica de genotipos tolerantes a aluminio, con alto potencial de rendimiento y precocidad. Según Valencia y Leal (2004), para la altillanura colombiana se han desarrollado alternativas genéticas con alta adaptación a suelos ácidos y prácticas de formación y manejo de la capa arable de estos oxisoles, donde la soya es alternativa fundamental de la rotación con gramíneas como maíz y arroz.

Uno de los objetivos de la investigación en mejoramiento genético en los últimos años ha sido desarrollar nuevas variedades de soya de alto beneficio socioeconómico y ambiental, como alternativa para reducir la dependencia de la variedad Soyica P-34. Esta variedad presenta una alta adopción, con más del 80% del área sembrada en Colombia, por su alto potencial genético, y presenta susceptibilidad a aluminio. Se comporta muy bien en suelos mejorados de la altillanura. La generación y el impacto de las nuevas variedades adaptadas a suelos ácidos de la altillanura colombiana han permitido la expansión del área de producción de materias primas en este agroecosistema. El rendimiento comercial promedio de soya pasó de 1,5 t ha⁻¹ a 2,6 t ha⁻¹, integrando el potencial genético de las nuevas variedades y el manejo de suelos, en sistemas productivos de rotación con maíz o arroz.

Estos nuevos productos tecnológicos están en proceso de adopción por la cadena productiva avícola-porcícola, por cuanto grandes inversionistas en la altillanura le apuestan a la aplicación de tecnologías de punta para superar la competencia con mercados externos. El reto es mejorar la competitividad del *cluster* para la producción de carne de cerdo y aves, donde la soya se constituye en materia prima esencial para la elaboración de alimentos balanceados. Los inversionistas ven factible desarrollar un proyecto exitoso para constituir un complejo agroindustrial, vinculado al *cluster* soya-maíz, alimentos balanceados, aves-cerdos. Este *cluster* buscaría, con base en los tamaños mínimos de las plantas de beneficios de pollo y de cerdos, cultivar maíz y soya, actividad integrada a los desarrollos en plantas de beneficio de los animales, plantas de recibo y secamiento de grano, plantas de alimentos balanceados, asistencia técnica a terceros, comercialización de insumos y de bienes finales.

Adicionalmente, las compañías productoras de semillas en Colombia, con aliados estratégicos líderes en investigación y desarrollo tecnológico, están dispuestas a ser facilitadoras del proceso de mercadeo de los nuevos productos tecnológicos en un accionar conjunto que permita optimizar recursos y aumentar los niveles de adopción de las nuevas variedades. Estos productos tienen un mercado asegurado, siempre y cuando las políticas estatales y los tratados de libre comercio permitan absorber la producción nacional de la soya.

En la actualidad, se presenta un escenario favorable para la producción nacional de la soya, por la crisis mundial de alimentos ante el aumento de la población y la demanda de las materias primas, así como por el auge de los biocombustibles. Los precios de esta materia prima son altamente favorables para los agricultores nacionales, registrando un precio CIF de US\$427 en el último trimestre de 2007, y en 2008 se registraron precios por tonelada de grano hasta de US\$565, desbordando su fluctuación histórica cercana a los US\$250 (Fenavi, 2009). Por su parte, la torta de soya, en el mismo periodo de referencia, registró un precio de 333 dólares (Portafolio, 2008). Esta es una señal de precios que debe aprovecharse para estimular la siembra, orientada a la producción de los alimentos balanceados que requiere el sector pecuario del país. No obstante, los avicultores ven amenazados sus negocios, motivo que ha contribuido para que se conviertan en productores y procesadores de estas materias primas.

A pesar de la crisis económica nacional y mundial, en el primer semestre de 2009 la industria avícola creció 1,32% y el huevo 7,4%, mientras la de pollo se redujo en 1,9%.

Las materias primas para la cadena avícola representan cerca del 65% de los costos de producción (Fenavi, 2009), razón por la cual existe una alta dependencia de la oferta de granos como la soya.

Ante estas oportunidades y escenarios de la producción de soya en Colombia, se hace necesario profundizar en el conocimiento de la tolerancia a aluminio y sus mecanismos, para desarrollar programas de mejoramiento efectivos.

Tolerancia de la soya al aluminio

Los suelos ácidos están distribuidos en el mundo y son prevalentes en países tropicales y subtropicales. El bajo pH de estos suelos solubiliza las formas iónicas de aluminio (Al) en la solución del suelo, haciendo a este elemento tóxico para las plantas, inhibiendo el crecimiento y la función radicular, lo cual resulta en pérdidas severas en la producción de los cultivos (Magalhaes, 2006). Este problema es serio en subsuelos muy ácidos que son difíciles de encalar, donde se reduce la profundidad radicular de la planta, se incrementa la susceptibilidad a sequía y decrece la utilización de nutrientes del subsuelo (Foy *et al.*, 1978; Spehar y Galwey, 1996; Rout *et al.*, 2001).

La estrategia más viable para el uso eficiente de estos suelos con problema de aluminio está en la generación de genotipos con adaptación específica, considerando que las variedades y especies de plantas difieren en su tolerancia al aluminio (Foy *et al.*, 1969) y sus variaciones representan una fuente importante para la producción de cultivos en suelos ácidos.

Bianchi *et al.* (1998) determinaron en soya –a partir del cruzamiento de Young (sensitivo a Al) x PI 416937 (tolerante)– que la tolerancia a aluminio es altamente heredable ($h^2 = 0,87$), y sugieren que de 3 a 5 genes pueden estar controlando la tolerancia. Sin embargo, en investigaciones posteriores, Bianchi *et al.* (2000) consideraron este carácter poligénico y encontraron QTL asociados con tolerancia a aluminio. Dos QTL fueron asociados con tolerancia a aluminio y baja eficiencia en el uso de agua, y un alelo de PI 416937 (marcador B122-1) fue asociado con dehiscencia de vainas. Por ello, el mejoramiento para suelos ácidos debe ser cauteloso en la utilización de las fuentes de tolerancia y sus grupos de ligamiento.

Mecanismos de tolerancia de la soya al aluminio

Los mecanismos de tolerancia al aluminio pueden ser diversos y diferir entre especies (Inostroza *et al.*, 2008, Ma *et al.*, 2001; Kochian, 1995; Delhaize y Ryan, 1995). En general, la acción tóxica del aluminio puede reducirse mediante

procesos de quelatación interna o externa del Al con diferentes compuestos celulares, como los ácidos orgánicos, las proteínas y los polisacáridos; aún hay grandes discrepancias sobre la importancia y relación de estos compuestos en la tolerancia diferencial a aluminio.

El mecanismo de mayor importancia en la tolerancia de soya al aluminio ha sido asociado con la exudación de ácidos orgánicos y la concentración de estos en el ápice radicular. Silva *et al.* (2001a) encontraron correlación positiva entre tolerancia a aluminio y exudación de citrato en ápices radiculares en soya. La fluorescencia con lumogalión indicó mayor cantidad de aluminio acumulado en la raíz en el genotipo susceptible Young que en el genotipo tolerante PI 416937, lo cual sugiere que los tolerantes excluyen el aluminio con la exudación de ácido cítrico. Las raíces laterales son más sensitivas al aluminio y contienen menores niveles de citrato. Un modelo esquemático de exclusión y detoxificación interna de Al lo proponen Kochian *et al.* (2004).

Similares resultados fueron observados por Yang *et al.* (2000), al concluir que la exudación de citrato fue significativamente más alta en Suzunari (tolerante) durante las 6 h/24 h de tratamiento con aluminio, la cual fue de 52/330 comparada con las Shishio (susceptible) 26/118 nmol/g peso fresco de raíz en 6 h, respectivamente. Esta exudación de ácido cítrico fue encontrada específica para aluminio, puesto que otros metales evaluados no indujeron exudación.

Estudios realizados por Liao *et al.* (2006) demostraron que en una solución homogénea con Al uniforme, la adición de P incrementó significativamente la tolerancia a Al en cuatro genotipos de soya diferentes en la eficiencia de asimilación de P. Los genotipos más eficientes en P presentaron más tolerancia a Al que los dos genotipos ineficientes en la asimilación del P en condiciones de alto P. El análisis de los exudados de raíz indicaron que la toxicidad de Al induce exudación de citrato, y la deficiencia de P, la exudación de oxalato. El incremento de malato fue inducido en los dos casos.

Mejoramiento genético de soya para suelos ácidos

La manipulación genética de la tolerancia a aluminio ha sido muy difícil, y el problema se caracteriza por la escasa diversidad genética entre variedades mejoradas y las discrepancias entre los métodos de selección (Bianchi *et al.* 2000); sin embargo, se han dado grandes avances en el

desarrollo de alternativas varietales para suelos del trópico con problemas de aluminio.

El mejoramiento genético de soya para suelos ácidos en bajas latitudes se inició en la década de los años 1970 en Brasil, con la introducción, hibridación y selección de cruces naturales y mutaciones, para lograr cultivares adaptados, conducidos por el Instituto Agronómico de Campinas (IAC) en busca de periodo juvenil largo, resistencia a enfermedades y alta producción de grano. De estos esfuerzos, la Empresa Brasileira de Investigación Agropecuária (Embrapa) liberó los primeros cultivares para suelos ácidos, Doko y BR-9 Sabana (Spehar 1994b; Spehar 1994c). En cruzamientos con las variedades BR83-147, UFV-9, BR-4 y Dorados, Spehar y Souza (2006) hallaron progenies tolerantes a aluminio, por lo que fueron determinadas como fuentes importantes de germoplasma para los programas de mejoramiento genético para suelos ácidos. Investigaciones realizadas por Campbell y Carter (1990) demostraron la alta tolerancia a sequía y al aluminio de la accesión de Japón PI 416937. En general, los métodos de mejoramiento aplicados para la generación de estas variedades adaptadas a suelos ácidos en Brasil, fueron: selección masal, pedigrí y pedigrí modificado, a partir de hibridación dirigida. Algunas variedades se han originado por cruzamientos naturales como FT-Cristalina y Emgopa 306 (Spehar, 1994b).

La soya fue introducida experimentalmente a Colombia en 1929, y su mejoramiento genético se inició en 1959. El programa de mejoramiento comenzó tratando variedades introducidas de Estados Unidos, como Missoy, Mamoth Yellow, Biloxi, Aksarben, Acadian, Hale 3, Hill y Davis (Bastidas y Agudelo, 1994). Desde su creación, el programa básicamente ha enfocado la investigación a la generación de soluciones tecnológicas relacionadas con: aumento de la productividad del grano, adaptación a condiciones edafoclimáticas específicas, resistencia a plagas y enfermedades, precocidad, tolerancia al complejo de acidez del suelo y alta calidad del grano (Valencia *et al.*, 2006, Salvagiotti, 2009).

El mejoramiento genético de soya para suelos ácidos en Colombia, se inició en el ICA, C. I. La Libertad, en Villavicencio, en 1984, en oasisoles de la altillanura. En un comienzo se evaluaron 1.089 accesiones de la colección mundial de soya; de esta, 421 fueron de Brasil, 226 de Taiwan y 422 de otros países, 407 poblaciones entre segregantes y líneas avanzadas del ICA, C. I. Palmira. Como producto de fuertes presiones de selección intra e interfamiliar, se obtuvieron las primeras líneas de soya tolerantes al 70% de saturación de aluminio, que recibieron la denominación de Litas.

La Línea Lita 09, por su gran adaptación y alto potencial genético, se liberó como la primera variedad de soya para suelos ácidos desarrollada en Colombia, con el nombre de Soyica Altillanura 2, con un rendimiento promedio de 1,5 t ha⁻¹ (Valencia, 2006b).

En la década de los ochenta, en el programa de mejoramiento de soya del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), se ejerció una alta presión de selección por tolerancia a aluminio, pero se sacrificó en alto grado la producción de grano. En los noventa, el esquema fue modificado para mejorar el potencial de expresión genética del rendimiento, para lo cual fue necesario aumentar la saturación de bases del suelo a un nivel cercano del 50%, utilizando la fórmula de Raji *et al.* (1985), para proporcionar un mejor balance nutricional a la planta. Con esta nueva estrategia de evolución y selección se lograron superar los rendimientos potenciales experimentales de 1,8 a 4,0 t ha⁻¹. La primera variedad liberada con este nuevo esquema fue Orinoquia 3, luego Corpoica Libertad 4, Corpoica Taluma 5 y Corpoica Superior 6, como alternativas varietales para la altillanura colombiana (Valencia *et al.*, 2006), las cuales presentaron alto potencial de rendimiento, tolerancia a enfermedades y calidad de grano.

Los procesos de selección y generación de las primeras variedades colombianas tolerantes a aluminio se llevaron a cabo en invernadero y campo, combinando procedimientos de selección intra e interespecífica, con el empleo de métodos de selección masal, pedigrí y descendencia simple. Variedades tradicionales colombianas de alto potencial genético se cruzaron con genotipos foráneos de Brasil y Estados Unidos para superar los limitantes de adaptación. Adicionalmente, fueron vinculados procesos de selección en cultivos hidropónicos descritos por Spehar (1994a), Ferrufino *et al.* (2000), Villagarcía *et al.* (2001) y Silva *et al.* (2001b), con ajustes metodológicos que permitieron la selección efectiva de genotipos de soya tolerantes a aluminio para la altillanura colombiana.

Valencia (2002) desarrolló una metodología de selección rápida de genotipos tolerantes a aluminio, denominada método de recuperación radicular (MRR) y la compararon contra la metodología de manchado con hematoxilina (MMH) (Polle *et al.*, 1978) y pruebas de campo. Evaluaron las variedades Soyica P-34 y Soyica P-33 (susceptibles), Soyica Ariari-1 (intermedia); Soyica Altillanura-2 y la Línea Lissa 09 (tolerantes), en solución nutritiva (Alva *et al.*, 1986), con diferentes niveles de aluminio (0, 100, 150, 160, 170 y 180 mM), en un diseño de parcelas divididas con factor principal los niveles de Al y secundario las variedades, en

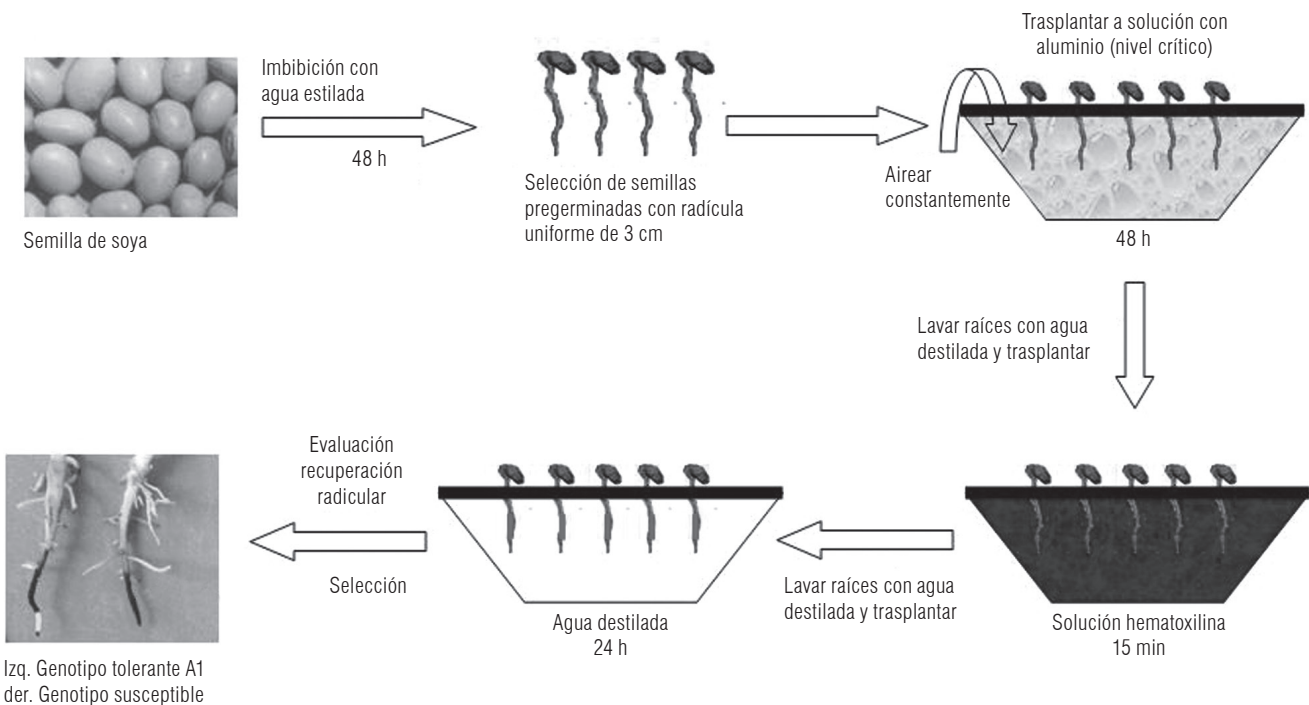


FIGURA 1. Metodología de selección rápida de genotipos de soja tolerantes a aluminio.

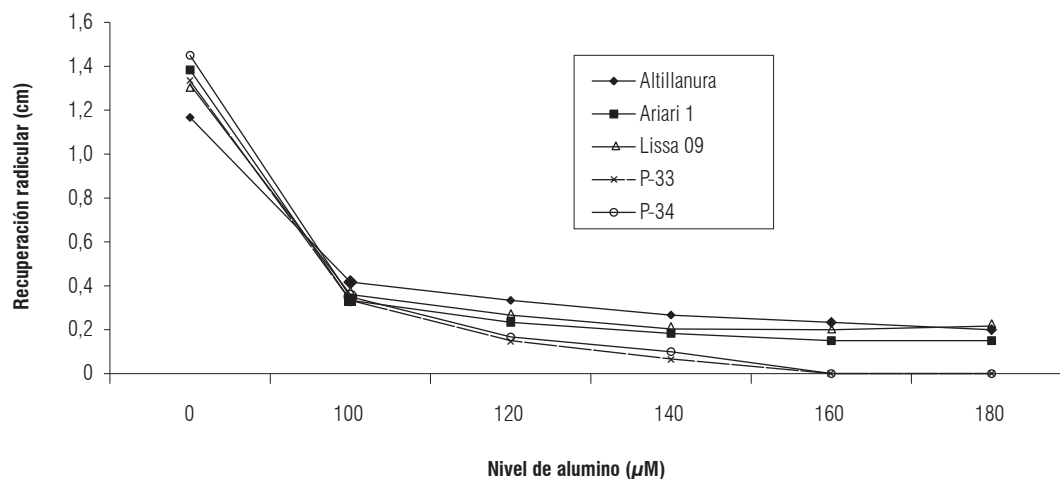


FIGURA 2. Recuperación radicular de genotipos de soja sometidos a estrés con Al.

condiciones controladas de luz (12 h de luz a $650 \text{ mM m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), temperatura (24°C) y humedad relativa (80%), utilizando un fitotrón marca Conviron CMP3244. El pH de las soluciones se mantuvo en $4,2 \pm 0,1$. En la Fig. 1 se presenta la descripción esquemática de la metodología de selección rápida genotipos de soja tolerantes a aluminio.

Los genotipos fueron también evaluados en condiciones de suelo ácido, para medir la eficiencia de los métodos de selección. En la longitud de manchado radicular con hematoxilina (MMH), aunque fue diferencial entre genotipos, no se encontró relación con la tolerancia o susceptibilidad

al aluminio, mientras que la capacidad de recuperación de las raíces para continuar creciendo (MRR) después de ser sometidas a estrés con aluminio se redujo al incrementar la concentración de aluminio en el medio, con efectos contrastantes entre genotipos. A diferencia de los genotipos tolerantes, los susceptibles en un nivel de 160 mM de aluminio no mostraron recuperación (Fig. 2).

En cortes transversales del tejido radical de la variedad Soyica P-34 (susceptible), se observó destrucción de paredes celulares, plasmólisis celular, espacios intercelulares anormales y reducido número de células del parénquima

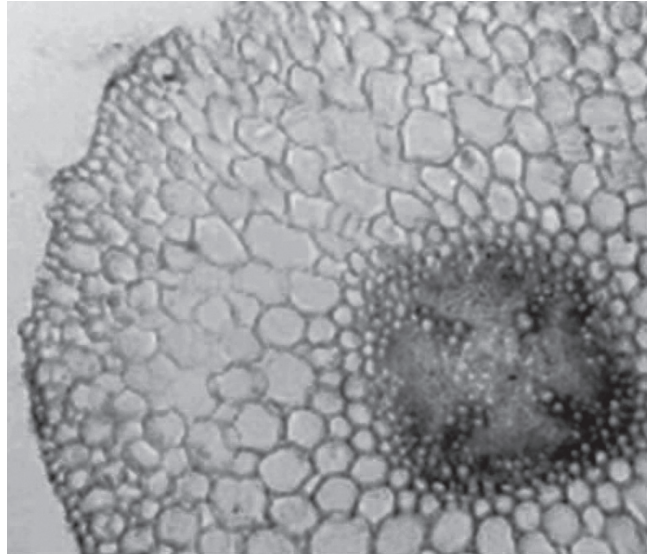


FIGURA 3. Corte transversal de raíz de soja variedad susceptible Soyica P-34, en medio de crecimiento con aluminio (140 mM Al).

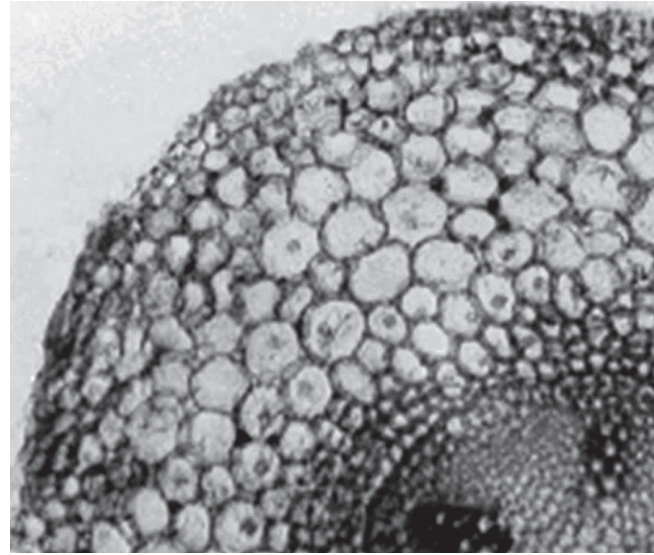


FIGURA 4. Corte transversal de raíz de soja variedad tolerante Corpoica Taluma 5, en medio de crecimiento con aluminio (160 mM Al).

cortical (Fig. 3). En contraste, la Línea Lissa 09 (tolerante) presentó engrosamiento de las paredes, células sin daño aparente, núcleos rodeados de numerosos amiloplastos y mayor número de células del parénquima (Fig. 4). La técnica de recuperación radicular (RR) correlacionó positivamente con el peso seco de las plantas en campo (PSAR), por lo que se constituye en una excelente alternativa para la selección rápida de genotipos tolerantes a aluminio.

Otras opciones del mejoramiento genético de variedades tolerantes a aluminio las describen De la Fuente y Herrera-Estrella (1999), De la Fuente *et al.* (1997) y Barone *et al.* (2008), a través de la generación de plantas transgénicas que permitan incrementar la síntesis y excreción en la raíz de ácidos orgánicos que inactiven el aluminio tóxico. Aunque la producción de plantas transgénicas tolerantes a aluminio es una alternativa estratégica para incrementar la producción de cultivos en suelos ácidos, sus avances son todavía muy tangenciales por la complejidad de los mecanismos que controlan la tolerancia.

Retos de la investigación en soja para la altillanura

Para abastecer parte de la demanda interna de grano de soja y competir con los mercados internacionales, es necesario que Colombia afiance los procesos de investigación y desarrollo tecnológico que permita una producción altamente competitiva. Una alternativa es la generación de nuevas variedades con adaptación específica, de alto potencial de rendimiento y eficientes en la utilización de los recursos de

producción, enmarcadas en el contexto conservacionista de los agroecosistemas.

En mejoramiento genético, el programa deberá orientarse a la obtención de variedades adaptadas a 50% de saturación de bases, precoces menores de 90 d a madurez fisiológica, tolerancia a estrés hídrico, tolerancia a enfermedades de importancia económica, como mancha ojo de rana (*Cercospora sojina*), pústula bacteriana (*Xanthomonas axonopodis* pv. *glycines*), tizón bacteriano (*Pseudomonas glycinea*), mildew (*Peronospora manshurica*), mancha marrón (*Seporia glycines*) y roya (*Phakopsora* sp.), y con un potencial de rendimiento de grano igual o superior a 4 t ha⁻¹. Para ello, se requiere el acceso a recursos genéticos foráneos y ampliamente diversos, procedentes particularmente de Brasil, Estados Unidos y China.

La utilización de técnicas de transformación genética podrían facilitar la incorporación de genes de interés relacionados con la tolerancia a aluminio, donde la expresión se diera exclusivamente a nivel raíz como órgano más sensible. Estas plantas transgénicas aportarán grandes beneficios en el desarrollo de soluciones tecnológicas para sabanas nativas saturadas con aluminio. Sin embargo, es importante resaltar que, en Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), como entidad reguladora encargada de aprobar OGM para uso agrícola y pecuario, recientemente autorizó la siembra comercial de la primera variedad de soja transgénica Roundup Ready (MON-04032-6), mediante la Resolución No. 2404 del 17 de julio de 2010 (Agrobio, 2010) que se constituye en

el primer evento OMG de soya liberado en Colombia. El desarrollo de eventos OMG en soya para suelos ácidos están aún en proyección.

Establecer por técnicas biológicas los patrones moleculares de genotipos de soya que permitan no solo la identificación y protección de los nuevos productos tecnológicos, sino también acelerar los procesos por selección asistida para tolerancia a aluminio. El mejoramiento genético apoyado con herramientas moleculares y en el uso efectivo del recurso genético disponible en el germoplasma internacional de acceso restringido permitirá acelerar los procesos de mejora de la especie en oxisoles e incrementar las ganancias genéticas.

Para la generación y liberación de variedades tolerantes a aluminio altamente productivas estables, se sugiere realizar ensayos multiambientales y aplicar modelos estadísticos altamente confiables en la determinación de la interacción genotipo-ambiente, como AMMI (*Additive main effects and multiplicative interaction method*) y SREG (*Sites Regression Model*), descritos por Burgueño *et al.* (2002).

En general, para alcanzar la máxima productividad en la altillanura, la oferta de los recursos de producción como agua, luz, nutrientes y oxígeno deberán estar disponibles no solo en forma y cantidad, sino también en el tiempo que la planta los requiera, con el fin de asegurar la máxima producción de grano. Para ello, se requiere profundizar la investigación sobre manejo integral de suelos en física, química y biología, con énfasis en labranza de conservación y sistemas de producción, considerando épocas de siembra, densidades de siembra, coberturas y rotación de cultivos, que hagan posible una producción sostenible y rentable de la soya en la altillanura colombiana.

Conclusiones

La globalización de la economía, el cambio climático y la política de los biocombustibles hacen de la soya una gran alternativa de producción como elemento importante de los sistemas de producción en rotación con gramíneas. Es una especie que presenta dentro de su diversidad fuentes de tolerancia a aluminio, lo cual ha permitido la mejora progresiva de la especie.

Los grandes avances en mejoramiento genético por tolerancia a aluminio han hecho posible la incorporación de agroecosistemas como la altillanura colombiana a la producción nacional de soya como materia prima de alimentos balanceados para la cadena avícola-porcícola y de la alimentación humana.

Literatura citada

- Agrobio. 2010. Colombia aprueba soya GM para siembras comerciales. En: www.agrobio.org; consulta: julio de 2010.
- Agronet. 2009. Oferta agropecuaria. ENA – Cifras 2009. En: www.agronet.gov.co; consulta: julio de 2010.
- Alezones, J. y J. Zocco. 2007. Mejoramiento genético y producción de semilla de soya. En: Resúmenes Ciclo de Conferencias en Fundación Danac. Yaracuy, Venezuela.
- Alva, A.K., D.G. Edwards, C.I. Asher y F.P. Blamey. 1986. Relationships between root length of soybean and calculated activities of aluminum monomers in nutrient solution. *Soil Sci. Amer. J.* 50, 959-962.
- Amézquita, E. 1998. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos orientales y sus requerimientos de labranza. pp. 145-174. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Villavicencio, Colombia.
- Barone, P., D. Rosellini, P. LaFayette, J. Bouton, F. Veronesi y W. Parrott. 2008. Bacterial citrate synthase expression and soil aluminum tolerance in transgenic alfalfa. *Plant Cell Rep.* 27(5), 893-901.
- Bastidas, G. y O. Agudelo. 1994. El cultivo de la soya. Manual de asistencia técnica No. 60. ICA; Corpoica, Palmira, Colombia.
- Bianchi-Hall, C.M., T.E. Carter, T.W. Ruffy, C. Arellano, H.R. Boerma, D.A. Ashley y J.W. Burton. 1998. Heritability and resource allocation of aluminum tolerance derived from soybean PI 416937. *Crop Sci.* 38, 513-522.
- Bianchi, C., T. Carter, M. Bailey, M. Mian, T. Ruffy, D. Ashley, H. Boerma, C. Arellano, R. Hussey y W. Parrott. 2000. Aluminum tolerance associated with quantitative trait loci derived from soybean PI 416937 in hydroponics. *Crop Sci.* 40, 538-545.
- Borkert, C.M. y G.J. Sfredo. 1995. La fertilización de los suelos tropicales para el cultivo de la soya. pp. 175-200. En: FAO (ed.). El cultivo de la soya en los trópicos. Mejoramiento y producción, Colección FAO: Producción y protección vegetal 27. Empresa Brasileira de Investigación Agropecuaria; Centro Nacional de Investigación sobre la Soja, Roma.
- Burgueño, J., J. Crossa y M. Vargas. 2002. SAS Programs for graphing GE and GGE biplots. En: Biometrics and Statistics Unit, CIMMYT, <http://www.cimmyt.org/ru/programs-and-units/units-a-labs/crop-research-informatics-laboratory/disciplinary-groups-units/biometrics-and-statistics-unit>; consulta: junio de 2010.
- Campbell, K. y T. Carter. 1990. Aluminum tolerance in soybean: I. Genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. *Crop Sci.* 30, 1049-1054.
- Corpoica. 2009. Rutas tecnológicas y productivas. Llanos Orientales de Colombia. Boletín informativo, Villavicencio (Colombia).
- De la Fuente M., J.M. y L. Herrera-Estrella. 1999. Advances in the understanding of Aluminum toxicity and the development of Aluminum-tolerant transgenic plants. *Adv. Agron.* 66, 103-120.
- De la Fuente, J.M., V. Ramírez-Rodríguez, J.L. Cabrera-Ponce y L. Herrera-Estrella. 1997. Aluminum tolerance in transgenic plants by alteration of citrate synthesis. *Sci.* 276(5318), 1566-1568.
- Delhaize, E. y P. Ryan. 1995. Aluminium toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiol.* 107, 315-321.

- FAO. 2009. FAOSAT, En: <http://faostat.fao.org/default.aspx>; consulta: junio de 2010.
- Fenavi. 2009. La avicultura en el semestre A: Crecimiento en medio de la recesión. *Avicultores* 165, 8-19.
- Ferrufino, A., T. Smyth, D. Israel, y T. Carter Jr. 2000. Root elongation of soybean genotypes in response to acidity constraints in a subsurface solution compartment. *Crop Sci.* 40, 413-421.
- Foy, C., A. Fleming y W. Armiger. 1969. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agron. J.* 61, 505-511.
- Foy, C.D., R. Chaney y M. White. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 29(1), 511-566.
- Inostroza, C., B. Soto, P. Ulloa, F. Aquea y M. Reyes. 2008. Mecanismos de resistencia a la fitotoxicidad por aluminio (Al^{3+}) en cereales: bases fisiológicas, genéticas y moleculares. *Rev. Ciencia Suelo Nutr.* 8(3), 57-71.
- Liao, H., H. Wan, J. Shaff, X. Wang, X. Yan y L. Kochian. 2006. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system. *Plant Physiol.* 141(2), 674-684.
- Kochian, L. 1995. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46, 237-260.
- Kochian, L., O. Hoekenga y M. Piñeros. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55, 459-493.
- Ma, J., P. Ryan y E. Delhaize. 2001. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends Plant Sci.* 6(6), 273-278.
- MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2005. Anuario estadístico del sector agropecuario y pesquero. Bogotá.
- MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2008. Estadísticas del sector agropecuario. Principales indicadores agropecuarios. Bogotá
- Magalhaes, V. 2006. Aluminum tolerance genes are conserved between monocots and dicots. *PNAS* 103(26), 9749-9750.
- Molina, D., E. Amézquita y P. Hoyos. 2003. Construcción de capas arables en suelos oxisoles de la Altillanura colombiana. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. pp. 113-117. En: Resúmenes VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile.
- Polle, E., C. Konzak y J. Littrik. 1978. Visual detection of aluminium tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. *Crop Sci.* 18, 823-827.
- Portafolio. 2008. Altos precios internacionales de insumos comenzaron a sentirse en Colombia. En: www.portafolio.com.co; consulta: diciembre de 2008.
- Rajj, B., N. da Silva, O. Bataglia, J. Quaggio, R. Hiroce, H. Cantarella, R. Belinazzi Jr., A. Dechen y P. Trani. 1985. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. *Bol. Téc.* 100. Instituto Agrônomo, Campinas, SP.
- Ridner, E. 2006. Soya, propiedades nutricionales y su impacto en la salud. Grupo QSA, Sociedad Argentina de Nutrición, Buenos Aires.
- Rout, G., S. Samantaray y P. Das. 2001. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie* 21, 3-21.
- Salvagiotti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. pp. 79-85. En: Resúmenes XVII Congreso AAPRESID, "La Era del Ecoprogreso". Rosario, Argentina.
- Silva, I., T. Smyth, C. Raper, T. Carter y T. Rufty. 2001a. Differential aluminum tolerance in soybean: An evaluation of the role of organic acids. *Physiol. Plant.* 112(2), 200-210.
- Silva, I., T. Smyth, D. Israel y T. Rufty. 2001b. Altered aluminum inhibition of soybean root elongation in the presence of magnesium. *Plant Soil* 230(2), 223-230.
- Spehar, C. 1994a. Aluminium tolerance of soybean genotypes in short-term experiments. *Euphytica* 76, 73-80.
- Spehar, C. 1994b. Breeding soybeans to the low latitudes of Brazilian Cerrados (savannahs). *Pesq. Agropec. Bras.* 29(8), 1167-1180.
- Spehar, C. 1994c. Field screening of soya bean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Euphytica* 76(2), 73-80.
- Spehar, C. y N. Galwey. 1996. Diallel analysis for aluminium tolerance in tropical soybeans [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Theor. Appl. Genet.* 92, 267-272.
- Spehar, C. y L. Souza. 2006. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. *Pesq. Agropec. Trop.* 36(1), 1-6.
- USDA. 2007. Soybeans and oil crops. USDA Soybean projections, 2007-16. En: <http://www.ers.usda.gov/Briefing/SoybeansOilCrops/2007baseline.htm>; consulta: junio de 2010.
- Valencia, R. 2002. Eficiencia de dos métodos de selección rápida de genotipos de soya tolerantes a aluminio. *Revista Achagua* 6(8), 24-31.
- Valencia, R. y D. Leal. 2004. Genetic alternatives form production system in the acid-soil savannas of the Colombian Orinoquia. pp. 127-140. En: Guimarães, E.P., J.I. Sanz, I.M. Rao, M.C. Amézquita y E. Amézquita (eds.). *Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina*. Embrapa; CIAT, Cali, Colombia.
- Valencia, R. 2006. Capítulo II. Variedades de soya de importancia económica para la Orinoquia colombiana. pp. 73-84. En: *Soya (Glycine max* (L.) Merrill) Alternativa para los sistemas de producción de la Orinoquia colombiana. Manual técnico No. 9. Copoica, Bogotá.
- Valencia, R., H. Carmen, H. Vargas y G. Arrieta. 2006. Variedades mejoradas de soya para zonas productoras actuales y potenciales de Colombia. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 4(2-3), 7-15.
- Vera, R. 2000. Investigación en sistemas agropastoriles: antecedentes y estrategias. pp. 1-6. En: Guimarães, E.P., J.I. Sanz, I.M. Rao, M.C. Amézquita y E. Amézquita (eds.). *Sistemas agropastoriles en sabanas tropicales de América Latina*. Ciat; Embrapa, Cali, Colombia.
- Villagarcía, M., T. Carter Jr., T. Rufty, A. Niewoehner, M. Jennette y C. Arrellano. 2001. Genotypic rankings for aluminum tolerance of soybean roots grown in hydroponics and sand culture. *Crop Sci.* 41, 1499-1507.
- Yang, Z., M. Sivaguru, W. Horst y H. Matsumoto. 2000. Aluminium tolerance is achieved by exudation of citric acid from roots of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plantarum* 110(1), 72-77.

