

Capítulo 3.

Proceso de mejoramiento genético para la obtención de variedades de yuca registradas en Colombia

Hernán Ceballos Lascano, Elvia Amparo Rosero Alpala, Sandra Milena Salazar Erazo, Nelson Morante Herrera, Lizbeth Pino Durán, Eberto Rodríguez Henao, Fernando Calle Calle, Jorge Iván Lenis Calderón

Citotaxonomía, diversidad, comportamiento floral y técnicas de hibridación

La especie *Manihot esculenta* Crantz pertenece al género *Manihot* y a la familia Euphorbiaceae. Tres subespecies han sido reconocidas: *M. esculenta* subsp. *esculenta*, la cual es domesticada e incluye a todos los cultivares conocidos como cultivo; la silvestre *M. esculenta* subsp. *peruviana*, encontrada en el oriente del Perú y occidente del Brasil, y la silvestre *M. esculenta* subsp. *flabellifolia*, que muestra amplia distribución desde la zona central del Brasil hasta la Amazonia venezolana. La amplia distribución de las dos especies silvestres hace difícil la asignación de un origen de domesticación (Allem, 1994), asimismo su origen como especie es aún desconocido. La yuca es una especie funcionalmente diploide, $2n = 2x = 36$ (Nassar & Ortiz, 2008), aunque se ha sugerido que ciertas porciones del genoma pueden estar duplicadas y, por lo tanto, la yuca puede tratarse como un alotetraploide segmental (Magoon et al., 1969). La yuca es una especie altamente diversa, en la cual se reconoce que solo un tercio de su diversidad se encuentra conservada en colecciones *ex situ*. La más grande colección se encuentra custodiada por el CIAT, donde se alberga alrededor de 6.500 accesiones; seguida por la de Embrapa, con 4.000, y la del International Institute of Tropical Agriculture (IITA), con cerca de 3.700 accesiones.

La yuca es una especie monoica. Las flores femeninas abren normalmente entre 10 y 14 días antes que las masculinas, que se encuentran en el mismo racimo floral; pero la autofecundación puede suceder en flores de diferentes racimos florales o racimos provenientes de diferentes plantas. La autopolinización y la polinización cruzada son mecanismos para la producción de poblaciones segregantes; sin embargo, dependen del genotipo, el diseño de la plantación y el tipo de insectos polinizadores presentes. En general, las plantas con mayores niveles de ramificación presentan mayor habilidad en la producción de inflorescencias, mientras que plantas de hábito erecto carecen de estructuras florales (Jennings & Iglesias, 2002).

Esta característica es importante en la floración de la yuca, ya que está estrechamente ligada con la ramificación en la planta. Cuando se inicia el primordio floral, inmediatamente se activa el desarrollo de ramas por debajo de él. En el primer evento de floración (que puede ocurrir entre los 3 y 12 meses después de la siembra, dependiendo de la variedad), las ramas asumen una fuerte dominancia apical, "ahogando" el desarrollo de la inflorescencia, a la que generalmente aborta sin generar frutos ni semillas. A partir del segundo evento de floración (que generalmente ocurre entre 30 y 60 días luego del primero), las inflorescencias pueden competir con las ramas que se desarrollan por debajo de ellas y, por lo tanto, pueden eventualmente producir frutos y semillas. Dependiendo de cuán pronto se inicia la floración y de cuántas veces la planta florece durante su desarrollo, se pueden presentar plantas con ramificaciones bajas (a unos 30 cm del suelo) y frecuentes (cada 30-50 cm), lo que resulta, o bien en plantas muy ramificadas, o bien en plantas que no florecen y por lo tanto presentan un porte totalmente erecto. La figura 3.1 ilustra genotipos contrastantes de yuca en relación con su arquitectura y hábito de crecimiento.

Desde el punto de vista botánico, las flores de yuca, así como las de otras especies de euforbiáceas, son de tipo inflorescencia. Las flores de yuca son en realidad apétalas, y lo que pareciera ser tépalos (fusión de sépalos y pétalos) es en realidad brácteas. Las flores masculinas están reducidas a un solo estambre, pero, contrario a lo que sucede con las flores femeninas, se fusionan entre sí para producir una inflorescencia de diez flores, cada una con un estambre (figura 3.2). En otras palabras, lo que normalmente se llama "flores" masculinas es en realidad una inflorescencia, conocida como *ciato*, que está protegida por brácteas y bracteólas. Las flores femeninas con un ovario trilobular también son llamadas *ciatos*.

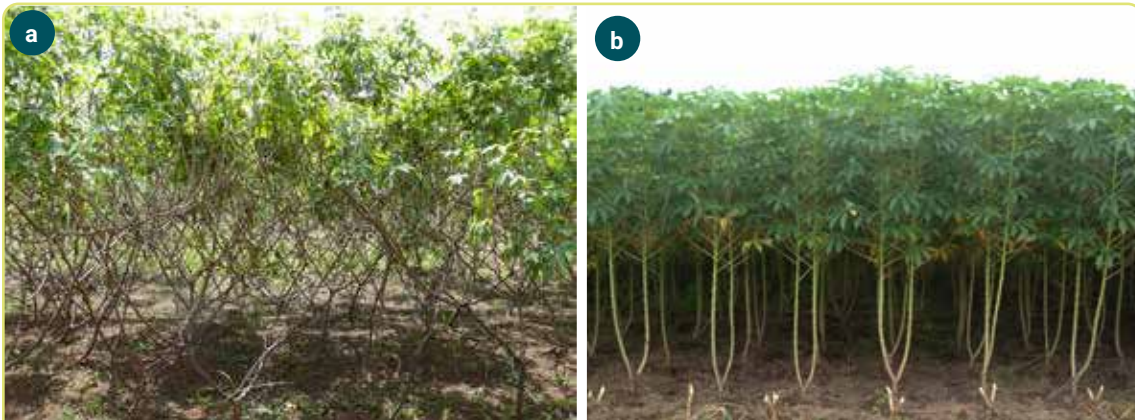


Figura 3.1. Ilustración de arquitectura de planta y niveles de ramificación. a. Clon de yuca con inicio de floración temprana y numerosos eventos de floración, que condujeron a una arquitectura altamente ramificada; b. Porte erecto de un clon que aún no ha florecido y, por lo tanto, no ha ramificado.

Fotos: Hernán Ceballos Lascano

Los agricultores claramente prefieren variedades erectas, que no ramifican. Lamentablemente, la ausencia o una reducida ramificación implica también ausencia o limitada floración. Teniendo en cuenta que el hábito de crecimiento (niveles de ramificación y por tanto número de eventos de floración durante el desarrollo de la planta) es altamente heredable, esto representa un serio problema para el mejoramiento genético de la yuca. Los genotipos más deseables (por su arquitectura erecta) son los más difíciles de cruzar. Afortunadamente se han logrado avances importantes en la manipulación e inducción temprana de la floración en genotipos erectos de yuca. Colombia ha sido pionera en estos progresos, que dependen de una inducción temprana de la floración en cultivares recalcitrantes mediante la extensión del fotoperiodo (figura 3.3), apoyada por la poda de primordios de ramas, lo que fortalece la dominancia apical de la inflorescencia, con un marcado aumento del número de flores y semillas que pueden obtenerse en el primer evento de floración (figuras 3.4 y 3.5) (Pineda, et al., 2020; Pineda, Morante et al., 2020).



Figura 3.2. Morfología de estructuras florales en la yuca. a. Flor femenina; b. Flor masculina; c. Primordio de inflorescencia, que ilustra la fuerte dominancia apical de las ramas que se desarrollan por debajo suyo; d. Típica inflorescencia del segundo o tercer evento de floración; e. Ejemplo de inducción de floración combinada con la poda de ramas, que ilustra la profusión de flores en el primer evento de floración comparada con la fotografía c; f. Producción de frutos a partir del primer evento de floración (posible gracias a la poda de las ramas por debajo de la inflorescencia), el cual generalmente es estéril debido al temprano aborto de la inflorescencia.

Fotos: Marcela Pineda y Hernán Ceballos Lascano



Figura 3.3. Extensión del fotoperiodo a través de la exposición de las plantas a luz roja durante la noche. a. Plantas expuestas a luz roja como mecanismo de extensión del fotoperiodo; b, c, d. Efecto de la extensión del fotoperiodo (plantas en la derecha de cada fotografía) en la variedad Verónica.

Fotos:
Hernán Ceballos Lascano

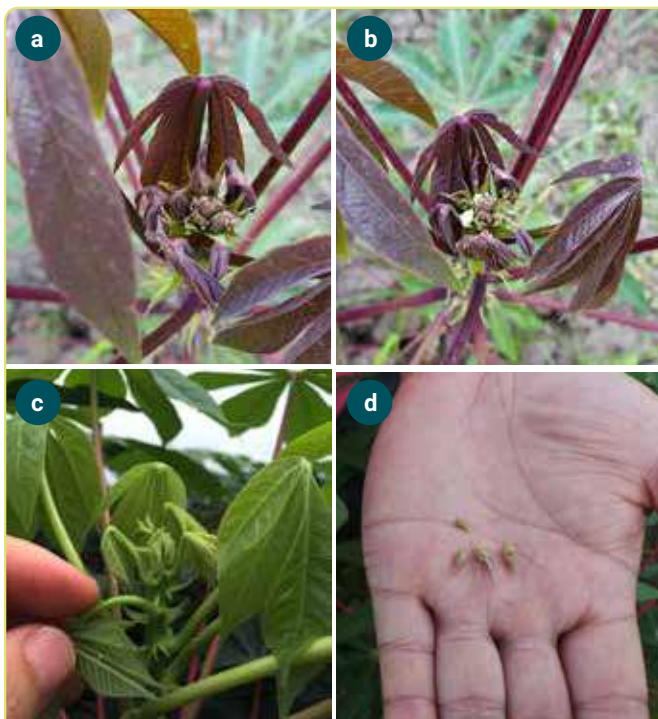
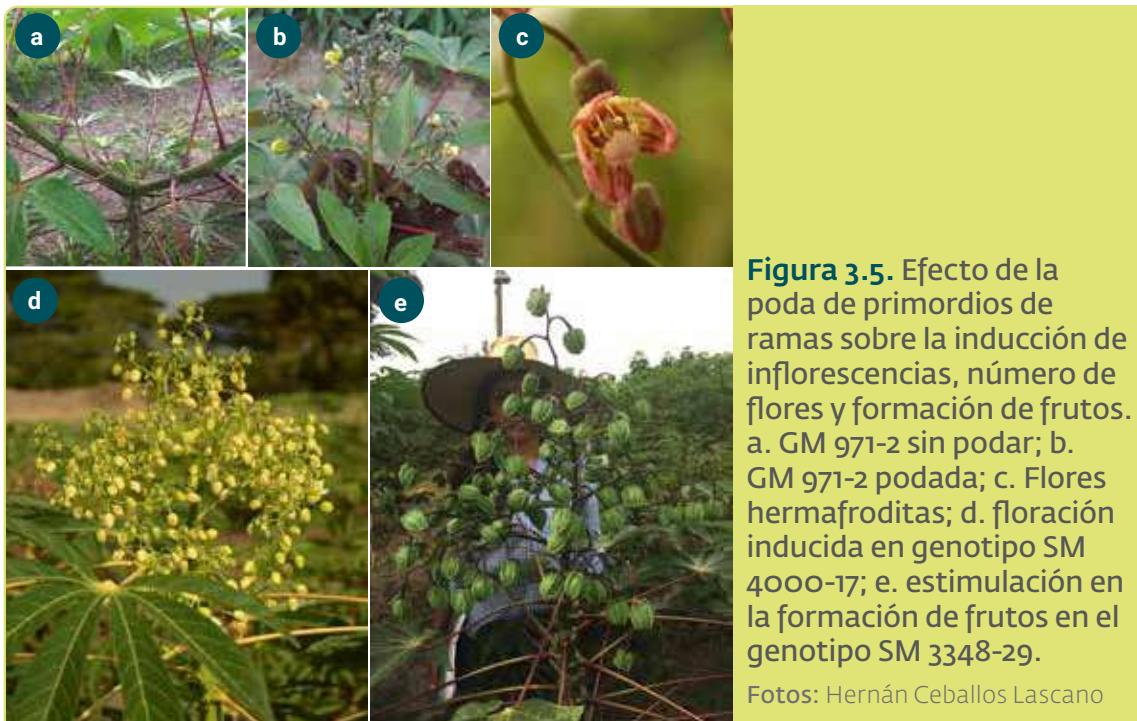


Figura 3.4. Poda de primordios de ramas para inducir dominancia apical de los primordios florales. a. Antes de la poda; b. Después de la poda; c. Aspecto globular del cogollo una vez que la floración ha iniciado; d. Tamaño de las ramitas recién podadas.

Fotos: Hernán Ceballos Lascano



Posterior a la polinización y subsecuente fertilización, el ovario se desarrolla para formar el fruto, el proceso hasta llegar a la madurez toma aproximadamente tres meses. El fruto tiene de 1,5 a 2,0 cm de diámetro, y es una cápsula dehiscente y trilobular de forma ovoide o globular con seis aristas longitudinales estrechas y prominentes (figura 3.6). La cápsula es dura, con tres lóculos, en cada uno de los cuales se forma una semilla. Las semillas, que tienen forma elíptica, pueden ser café o gris con moteado negro o café; el color depende del progenitor femenino.



Producción de semilla sexual de yuca en el CIAT

Para la producción de semilla sexual de yuca, el CIAT usa dos vías, las cuales se describen a continuación:

Cruzamientos controlados

Para cruzamientos controlados, se siembran de 10 a 20 plantas por genotipo seleccionado como parental. Cuando inicia la floración de los genotipos (típicamente se espera a la segunda floración), comienza la polinización manual. En horas de la mañana se escogen las flores femeninas, para ello se cubren con bolsas de tela (20 × 25 cm), con el objetivo de protegerlas de polen extraño. Las flores masculinas que van a abrir en ese mismo día son colectadas por la mañana (antes de su antesis) y conservadas en frascos de plástico o de vidrio identificados con el nombre del parental. La polinización se lleva a cabo descubriendo las inflorescencias femeninas y frotando suavemente las anteras con el polen sobre el estigma de la flor femenina. Esta operación se realiza luego del mediodía. Con una flor masculina se pueden polinizar hasta tres flores femeninas, dependiendo de la variedad, la cantidad y la calidad del polen que estas produzcan. Luego de efectuada la polinización, los racimos de flores se identifican con un marbete, en el cual se anotan los datos del cruzamiento: madre, padre, la fecha y el número de flores polinizadas (figura 3.7).

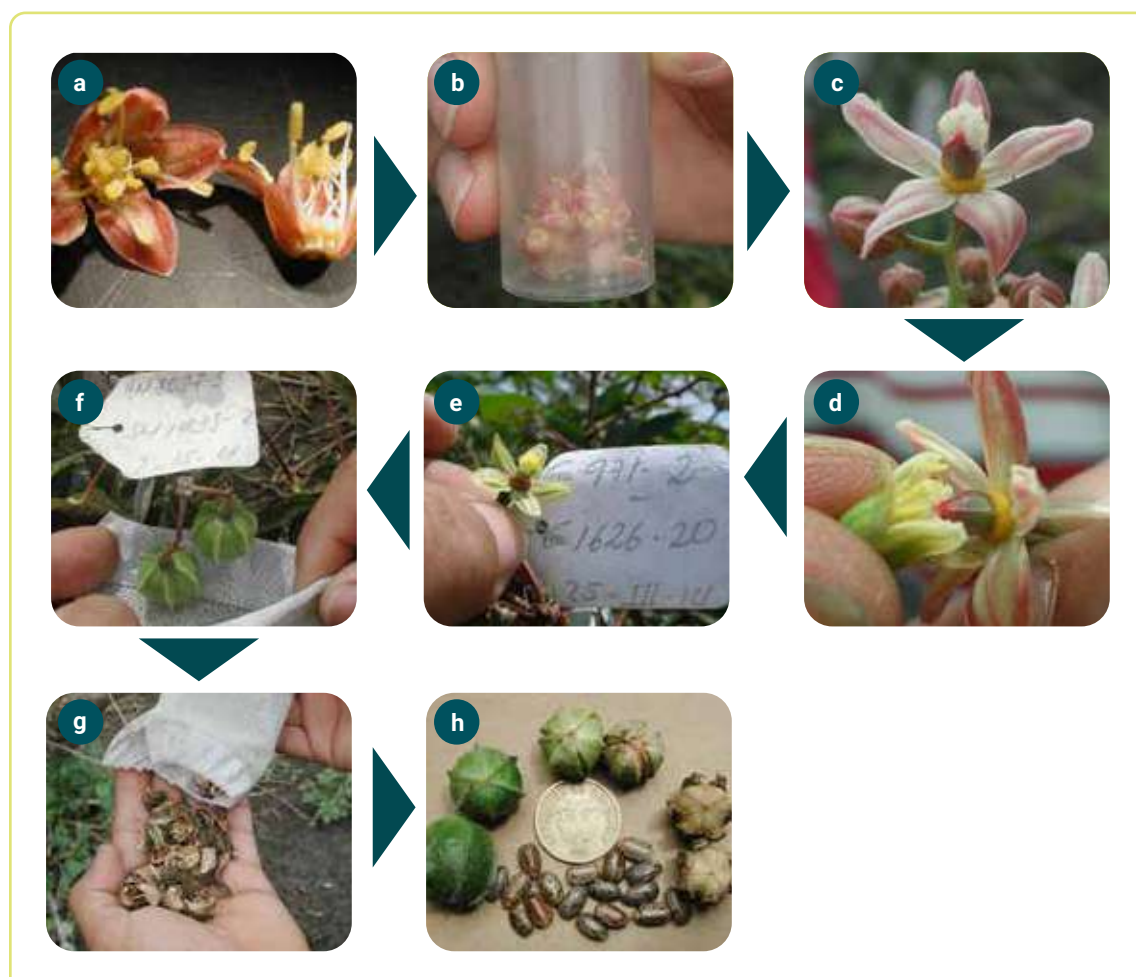


Figura 3.7. Proceso de polinización y producción de semilla híbrida o autofecundada en yuca. a. Flores masculinas con polen viable; b. Flores masculinas colectadas aptas para fecundar; c. Flor femenina receptiva; d. Proceso de emasculación usando flores masculinas previamente colectadas; e. Flor femenina polinizada con marcación realizada para identificar el cruzamiento, fecha y número de flores polinizadas (se observa el polen de color amarillo depositado en el estigma); f. Cobertura de frutos para evitar caída de semillas dehiscentes; g. Semillas colectadas en bolsa para posterior colecta; h. Semillas limpias listas para establecimiento en invernadero.

Fotos: Nelson Morante Herrera

Cruzamientos abiertos o libre polinización (policruzamientos)

Para la siembra de lotes de policruzamientos se usa el método más común, que es plantar una mezcla de clones seleccionados en bloques aislados. En este caso, la polinización es abierta y libre, donde intervienen los polinizadores naturales bióticos, principalmente abejas y abejorros (los abióticos son prácticamente inexistentes). Cuando ya se ha producido la polinización y hay formación de frutos, aproximadamente dos meses después de la fecundación, los racimos de frutos son cubiertos con una bolsa de tela, para evitar la pérdida de semillas, ya que el fruto es dehiscente. En este caso, se colectan las semillas de plantas individuales, manteniendo el registro del progenitor femenino (figura 3.8).



Figura 3.8. Frutos obtenidos en policruzamientos. a. Frutos secos sin marcación y producidos naturalmente por la planta; b. Frutos previamente cubiertos con malla de protección para evitar la caída de semillas por dehiscencia.

Fotos: Nelson Morante Herrera

En el caso de la polinización abierta, únicamente el progenitor femenino es conocido, y la fuente de polen es una mezcla proveniente de un grupo de clones conocidos. Las progenies que resultan de la polinización abierta de un progenitor femenino conocido son hermanos medios. Las plantas dentro de una familia de hermanos medios comparten similitudes fenotípicas entre sí, pero en menor medida que en el caso de hermanos completos, provenientes de cruzamientos controlados, en los que se conocen ambos progenitores.

Objetivos del mejoramiento genético, criterios de selección y su aporte en el mejoramiento del cultivo de yuca

El objetivo del mejoramiento genético de la yuca está basado principalmente en la adaptación de los genotipos a diferentes ambientes y al mercado para el que está dirigido (usos potenciales); sin embargo, existen características comunes clave para el mejoramiento de los distintos perfiles de productos finales: alto rendimiento de raíces frescas (RRF), alto y estable contenido de materia seca (CMS), tipo de planta deseable (TPD) y baja afectación de plagas y enfermedades endémicas.

Las condiciones ambientales afectan la expresión fenotípica de algunas características, particularmente de aquellas con baja heredabilidad. Parámetros productivos como el rendimiento son características típicamente poligénicas: son altamente afectadas por el ambiente y controladas por un gran número de genes, cada uno de los cuales tiene un impacto individual pequeño en la expresión del carácter. Por lo tanto, para una adecuada selección de genotipos promisorios, se deben realizar evaluaciones multilocales, que permiten descomponer dicha característica en términos de los efectos genéticos, ambientales y de la interacción del genotipo con el ambiente. En yuca, características como el RRF, el CMS y el TPD son altamente influenciadas por el ambiente (en orden decreciente, siendo mucho más relevante en el RRF que para el TPD), y su expresión en gran parte responde a la interacción (generalmente significativa) de genotipo \times ambiente (Boakye et al., 2013; Kvitschal et al., 2006; Lahai et al., 2013; Okechukwu et al., 2014; Okpara et al., 2014; Santos et al., 2013). El rendimiento de las raíces frescas en yuca obedece a la expresión de las rutas metabólicas asociadas con la síntesis, la translocación y el posterior almacenamiento de carbohidratos en las raíces; todas estas rutas metabólicas son en gran parte dependientes de las condiciones ambientales. Sin embargo, el nivel del efecto ambiental depende de cada genotipo (Boakye et al., 2013; Kvitschal et al., 2006) y de la característica fenotípica que se esté evaluando.

Debido a que la mayoría de los caracteres de interés económico del cultivo son de naturaleza cuantitativa, la varianza fenotípica se ve afectada por los efectos de la acción conjunta del genotipo, el entorno ambiental y la interacción del genotipo y el ambiente ($G \times A$), como lo describen en su tratado Allard y Bradshaw (1964). En consecuencia, la medición de estos atributos en un solo ambiente resulta en un procedimiento poco eficaz, puesto que la identificación de cultivares superiores debe basarse en el análisis de la interacción $G \times A$ y de la estabilidad fenotípica (Morais et al., 2008). Este último procedimiento es deseable para identificar los cultivares con comportamientos predecibles en diversos entornos ambientales. Entre las metodologías más utilizadas para este fin, se puede señalar las de Eberhart y Russel (1966), Lin y Binns (1988), Gauch y Zobel (1996), Toler y Burrows (1998) y, recientemente, el modelo de análisis de la interacción genotipo-ambiente (AMMI) (Barros et al., 2013, Gonçalves et al., 2010; Oliveira, Santana et al., 2014). Otros métodos de recomendación de genotipos se basan en el uso de índices de selección *multitraits*, conformados por varios atributos de interés del mejorador, los cuales ofrecen una clasificación que representa una estimación de la superioridad genética y la estabilidad fenotípica de uno o un grupo de genotipos (Sagrilo et al., 2008). La integración de varias características asegura la identificación de genotipos superiores en diversos aspectos, que incluso pueden impactar positivamente sobre la cadena de valor de un cultivo, lo que garantiza una mayor adopción de las variedades liberadas. Ceballos et al. (2016) reportaron el uso de estos índices de selección en yuca considerando aspectos agronómicos del cultivo, como el RRF, el CMS, el TPD, la respuesta a enfermedades y el índice de cosecha.

Debido a la alta influencia del ambiente sobre la respuesta de las características de interés, el uso de la estimación de parámetros genéticos es una importante guía en el momento de enfocar el proceso de mejoramiento, selección y determinación de ganancias genéticas. La estimación y predicción de parámetros y valores genéticos a través de los análisis *restricted maximum likelihood* y *best linear unbiased prediction* (REML/BLUP) han mostrado una alta precisión. Para variables relacionadas con el rendimiento de raíces frescas, el número de raíces por planta e incluso en el contenido de almidón en las raíces se han reportado valores de heredabilidad en el sentido amplio menores al 65% (Silva et al., 2016), aunque en ciertas poblaciones se han encontrado valores superiores tanto del RRF (78,39%) como del CMS en las raíces (87,55%) (Peprah et al., 2020). En las características de calidad como de contenido de almidón, contenido de glucósidos

cianogénicos, amilosa, entre otras, se han reportado valores superiores al 85% (Oliveira, Freitas et al., 2014). A pesar de ser un cultivo clonal, en yuca se recomienda garantizar un buen número de repeticiones (tres o cuatro), un buen diseño experimental y un buen manejo de los ensayos, de manera que la heredabilidad individual de los factores en estudio se maximice.

Para la generación de poblaciones segregantes, los progenitores son identificados de acuerdo con su adaptación a condiciones agroecológicas del cultivo y los sembrados en la Estación Experimental del CIAT, en Palmira (Valle del Cauca). A partir de los progenitores seleccionados se realizan cruzamientos para producir semilla sexual recombinante. Se ha podido determinar que las temperaturas más bajas promueven que en muchos genotipos la floración ocurra más tempranamente. Los experimentos de inducción a la floración mediante la extensión del fotoperiodo resultan en rendimientos más claros en Palmira (1.000 m s. n. m.) que en localidades más bajas (Pineda, Morante et al., 2020). Como ya se mencionará, existen dos tipos de cruzamientos: para los cruzamientos dirigidos se usa actualmente la sigla GM, seguida por cuatro dígitos, que identifican los progenitores femenino y masculino. Los cruzamientos de polinización abierta o policruzas se identifican con la sigla SM, seguida también por cuatro dígitos, que identifican el progenitor femenino y la parcela de cruzamiento donde la semilla fue obtenida (lo que permite determinar el grupo de progenitores masculinos que pudieron haber estado involucrados en la semilla botánica generada). Las semillas así obtenidas e identificadas son germinadas en bandejas, las plántulas crecen por dos meses en invernadero y posteriormente son transferidas a campo. Solo las plántulas vigorosas serán trasplantadas. Las parcelas donde crecen las plantas generadas a partir de semilla botánica germinada se denominan viveros F₁. Por muchos años los viveros F₁ se trasplantaban entre marzo y mayo, y las plantas crecían por un año. Los tiempos en que se realizaban estas actividades se ajustaban estrechamente con las fechas típicas en que los agricultores plantan la yuca, lo que sucede principalmente entre abril y junio de cada año.

Durante el crecimiento, los viveros F₁ se recorren y se eliminan las plantas que presentan cualquier tipo de síntomas de enfermedades, deficiencia nutricional y/o ataques severos de insectos. En el momento de la cosecha, se extraen las plantas del suelo, de modo que se pueda inspeccionar la planta entera: la relación entre el volumen de raíces y la biomasa total de la planta, llamada el índice de cosecha (INC); el vigor general de la planta (se

evitan tanto plantas demasiado vigorosas como las débiles), y una corona con buen número de raíces con tamaño uniforme, de forma cónico-cilíndrica y con pedúnculo relativamente corto. Se presta particular atención a la ausencia de raíces con síntomas de cuero de sapo y de pudrición de cualquier tipo. Se seleccionan plantas que presenten buen TPD, que permita obtener estacas de buena calidad en cuanto a grado de lignificación, diámetro y número de yemas. Los tallos seleccionados y cosechados en la etapa F₁ inician el proceso de multiplicación clonal, y son enviados a las respectivas zonas de adaptación, donde se inicia un proceso de evaluación fenotípica, que dura generalmente de cuatro a seis años. Se usan diferentes diseños experimentales, pasando por la evaluación de surco sencillo (ESS) o el campo de observación, con ocho plantas por genotipo plantadas en un surco y sin repeticiones. La selección de materiales en la ESS se realiza mediante un índice de selección, que integra variables relevantes: el RRF; el CMS, que es estimado por el método gravimétrico; el TPD, que incluye la arquitectura, el vigor y la sanidad de las plantas (se buscan tipos de planta erecto, con una altura promedio, ni excesiva ni demasiado baja), y el contenido de β -carotenos (BC) en las raíces, en proyectos de biofortificación, para generar variedades de yuca con alto valor nutricional. Este índice permite ordenar los genotipos evaluados de acuerdo con un orden de mérito, que por sí solo facilita el proceso de selección. Usualmente la ESS incluye la evaluación de alrededor de 1.500 genotipos en una sola localidad. Los genotipos seleccionados a partir de la ESS pasan a ser evaluados en ensayos preliminares de rendimiento (EPR), estableciéndose alrededor de 150 genotipos sembrados en dos o tres repeticiones de dos surcos, de cinco plantas cada uno. La siguiente etapa de evaluación y selección son los ensayos avanzados de rendimiento (EAR), los cuales ya se realizan en tres localidades, usando entre tres y cuatro repeticiones y parcelas de 20 plantas por genotipo. En los EAR el número de genotipos se ha reducido considerablemente (entre 40 y 80). Cualquier genotipo que se destaque de manera consecutiva durante los EAR pasa a ser considerado como élite y es incluido en las pruebas regionales (PR). Las PR se siembran en varias localidades, representativas de cada región agroecológica, con tres repeticiones por localidad. Si la disponibilidad de material de siembra lo permite, las parcelas en las PR son ligeramente más grandes, con cinco surcos de cinco plantas cada uno, en las que se cosechan las nueve plantas centrales de cada parcela. Las pruebas regionales típicamente se repiten por dos o tres años. Los genotipos que son postulados para su potencial liberación cuentan aproximadamente con quince evaluaciones en distintos años y localidades (Ceballos et al., 2016). Conforme a la Unión Internacional para la

Protección de la Obtención de Nuevas Variedades (UPOV, por sus iniciales en inglés), el registro y la liberación de genotipos como variedades comerciales es posible siempre y cuando se cumpla con un perfil superior, confirmado a través de su distinción, uniformidad y estabilidad (International Union for the Protection of New Varieties of Plants [UPOV], 2002). Para el caso de la yuca, al tratarse de un cultivo clonal, se garantiza su uniformidad, por su mecanismo de multiplicación vegetativa; por lo tanto, el proceso de selección a través de los años y en varios ambientes de las subregiones se realiza para demostrar la(s) característica(s) distintiva(s) frente a variedades previamente registradas y cuya estabilidad en el ambiente está garantizada.

Cambios significativos se han implementado en la forma en que se crecen los viveros F₁. Desde mediados de la década del 2010, se implementó una estrategia muy diferente, en la cual la semilla era germinada en agosto de cada año, trasplantada al campo a los dos meses de edad, y en los viveros F₁ solo se mantienen por seis meses luego del trasplante (Ceballos et al., 2020). En la época típica de cosecha (marzo-mayo), las plantas tienen unos seis meses de edad y permiten una selección para características de alta heredabilidad, como pigmentación de las raíces, ausencia de ramificación temprana, vigor adecuado y evidencia de un buen desarrollo de raíces potencialmente comerciales. A esa edad, sin embargo, solo tres esquejes de buena calidad pueden ser obtenidos. Estas tres estacas son plantadas en el ambiente objetivo en una sola localidad o cada una de ellas en tres localidades representativas del ambiente objetivo, en lo que se llama F₁C₁. Esta simple modificación de adelantar la germinación de la semilla botánica por seis meses (en una época donde no hay demasiadas actividades para el personal) tiene importantes consecuencias: a) las plantas de las que posteriormente se extraerán estacas para la plantación para la ESS crecen ya en condiciones representativas del ambiente objetivo; b) como se cuenta con tres plantas por genotipo en la F₁C₁, se puede sembrar para tres ESS, en tres localidades diferentes. Esto es un enorme avance para poder reducir el impacto negativo que la interacción G × A tiene sobre la eficiencia de la selección en las ESS.

En yuca, el mejoramiento genético ha contribuido enormemente en el progreso del cultivo, incluso se ha mencionado que este proceso ha finalizado la domesticación de este cultivo (Ceballos et al., 2013; Ceballos et al., 2021). Las variedades liberadas a partir de 1990 a nivel mundial han tenido un significativo incremento en RRF y CMS (Kawano, 2003; Kawano et al.,

1998); sin embargo, se ha evidenciado que la selección favorece genotipos con alto contenido de materia seca o alto rendimiento, y es muy difícil encontrar genotipos que expresen estas dos características simultáneamente (Ceballos & Hershey, 2016). Por esta razón, la adición de valor agregado al cultivo ha sido una característica que los mejoradores han percibido como una estrategia para la yuca, en lugar de solamente concentrar los esfuerzos en mejorar su rendimiento; la adición de valor nutricional a través del incremento de contenido de caroteno, de proteína, la producción de almidones especiales o la resistencia a enfermedades como el mosaico de la yuca CMD son algunos ejemplos (Aiemnaka et al., 2012; Ceballos et al., 2013; Rabbi et al., 2014). Por otra parte, resultados iniciales de la selección genómica en este cultivo han demostrado ser útiles, especialmente en características monogénicas o controladas por pocos genes, como la resistencia a enfermedades como el CMD y el estriado marrón de la yuca (CBSD); la precisión de la selección en el caso de la materia seca también parece ser suficiente para garantizar ciclos rápidos de selección genómica (Wolfe et al., 2017; Kayondo et al., 2018).

El cultivo de la yuca y su proceso de mejoramiento genético en Colombia

La yuca se caracteriza por una notable interacción $G \times A$, que resulta en una marcada especificidad de la adaptación de las variedades a condiciones ambientales determinadas. Por lo tanto, es importante realizar la selección en cada región agroecológica. De acuerdo con la Resolución 067516 del 2020 del ICA para el registro de variedades comerciales, se han identificado seis subregiones (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Principales subregiones naturales de Colombia en las que el cultivo de yuca es económicamente importante

Subregión natural	Departamentos/descripción de la subregión
Caribe (Caribe seco-Caribe húmedo)	Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, Sucre, Norte de Santander, distrito del Zulia, Norte de Antioquia y Urabá, Magdalena Medio y Santander
Pacífico	Chocó y zonas costeras de los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Nariño
Valles Interandinos	Valle geográfico del río Cauca-valle geográfico del río Magdalena
Andina < 1.800 m s. n. m.	Área cafetera marginal (800 m s. n. m.)-área cafetera (1.800 m s. n. m.)
Orinoquía	Vichada, Arauca, Casanare, Guainía, Guaviare, Vaupés y Meta
Amazonia	Amazonas, Caquetá y Putumayo

Fuente: Resolución 067516

Dentro de los actuales objetivos del mejoramiento genético de la yuca para las diferentes subregiones naturales de Colombia se busca encontrar genotipos promisorios, que cumplan con numerosos parámetros, tales como: a) rendimiento superior a 20 t/ha en producción comercial; b) contenido de materia seca superior al 35%; c) potencial de recuperación del contenido de materia seca en cosecha extendida en yuca para uso industrial; d) características especiales, como alto contenido de carotenos; e) rendimiento superior a 15 t/ha en manos de los agricultores, y f) adecuada calidad culinaria en variedades para consumo fresco. Se busca también una adecuada adaptación a los ambientes antes mencionados, esta condición representa una ventaja incomparable, debido a que la selección garantiza una baja afectación de plagas y enfermedades y demás factores bióticos y abióticos desfavorables relacionados con agroecosistemas específicos y dinámicos en términos de alteraciones climáticas.

La actual dinámica climática sugiere que por el calentamiento global y el cambio climático se podrían producir condiciones aún más adversas. A pesar de que la yuca ha sido considerada un cultivo estratégico para las

condiciones de cambio climático (Ceballos et al., 2011), se hace necesario evaluar los niveles de adaptabilidad y los factores climáticos asociados a la producción y eficiencia en el almacenamiento de almidones en las raíces. En un escenario de cambio climático, los modelos sugieren el posible incremento de la frecuencia del fenómeno de El Niño (Cai et al., 2014; Timmermann et al., 1999) y la precipitación tropical se reduciría en ciertas áreas a lo largo de los márgenes de las zonas de convección, las cuales desde ya sufren de deficiencia de agua (David et al., 2006). Estos cambios sugieren investigar sobre cultivares tolerantes al exceso o déficit de agua y adaptados particularmente a condiciones agroecológicas específicas, que garanticen la formación de sistemas resilientes de producción, especialmente en regiones altamente vulnerables.

AGROSAVIA, en alianza con el CIAT, se ha enfocado en las subregiones con mayor demanda debido a la importancia económica de este cultivo: Caribe, Pacífico, Orinoquía, Valles Interandinos y región Andina (< 1.800 m s. n. m.). Debido a la gran importancia del cultivo de la yuca en Colombia, el desarrollo de nuevas variedades se ha orientado con un enfoque participativo y de cadena agroindustrial, dirigiendo sus esfuerzos hacia el desarrollo de genotipos de alta productividad de raíces y materia seca para consumo en fresco. Recientemente se ha intensificado el debate sobre la necesidad de desarrollar genotipos con alta calidad nutricional, para ello se ha priorizado la biofortificación para contribuir a la superación de los problemas de seguridad alimentaria y extrema pobreza (Ceballos et al., 2013; Welsch et al., 2010). Este proceso de selección ha sido mejorado mediante la introducción y estandarización de técnicas de espectroscopia, como espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) acoplada a técnicas de regresión (Davrieux et al., 2016), que, considerando la alta heredabilidad y estabilidad de esta característica nutricional, permite eficientemente discernir diferencias entre genotipos (Ortiz et al., 2011). Tanto para yuca de consumo fresco como para uso industrial, nuevas técnicas de multiplicación masiva han permitido generar poblaciones de evaluación a gran escala, lo que ha posibilitado así el establecimiento de pruebas semicomerciales, con las cuales se pueden realizar en corto plazo pruebas industriales en plantas de extracción de almidón. Adicionalmente, se está trabajando en la obtención de genotipos con buena calidad culinaria, lo que permitirá tener una oferta de productos para consumo fresco.

Variedades mejoradas generadas en cooperación entre AGROSAVIA y el CIAT

Durante los años 80, fueron registradas por el ICA las tres primeras variedades de yuca en Colombia, con adaptación entre 0 y 1.500 m s. n. m.: Manihoica P-11, Manihoica P-12 y Manihoica P-13. En 1990 se liberaron las variedades Catumare (CM 523-7) y Cebucán (CM 2177-2), adaptadas a la Orinoquía (Rodríguez & Hershey, 1990). La primera variedad liberada por su adaptación a la región Caribe fue la ICA-Costeña (CG 1141-1), en 1991 (De la Torre & Hershey, 1991). Ya en esa época comenzaron a aplicarse los innovadores procedimientos de mejoramiento participativo para incorporar en el proceso de selección a los agricultores y sus prioridades. En 1993 se liberó la variedad ICA-Negrita (CM 3306-4), también adaptada a la Costa Atlántica (López Montes et al., 1993). Durante la década de los 90, se fue acentuando la necesidad de satisfacer las exigencias de distintas aplicaciones industriales, de modo que las variedades liberadas fueron de doble propósito: tanto para consumo humano (consumo fresco) como para fines industriales. La variedad Corpoica-Reina (CM 6740-7), adaptada al Piedemonte Llanero, cumplió con estas características, y fue liberada en el año 2000 (Ceballos, Calle et al., 2000; Ceballos, Iglesias et al., 2000). En ese mismo año se liberó otra generación de variedades adaptadas a la región Caribe. Sin embargo, por primera vez, se liberaron dos variedades específicamente dirigidas a las necesidades de la industria de almidones y concentrados para alimentación animal: Corpoica-Colombiana (CM 3306-19) y Corpoica-Sucreña (CM 3555-6) (López Montes et al., 2000a, 2000b). Las dos variedades restantes, Corpoica-Caribeña (SG 765-2) y Corpoica-Rojita (SG 765-4), seguían siendo de doble propósito (López & Jaramillo, 2000a, 2000b). En el año 2003 fue liberada la variedad Nataima-31 (CG 489-31), adaptada a los valles cálidos del Alto Magdalena (Vargas et al., 2002). Esta es la primera variedad en el mundo con resistencia a la mosca blanca (*Aleurotrachelus socialis* Bondar) (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Variedades de yuca inscritas en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales en Colombia

Uso	Variedad	Responsable	Creador	Fecha de registro	Adaptación
Consumo fresco	Manihoica P-11	ICA		1984	0-1.500 m s. n. m.
Consumo fresco	Manihoica P-12	ICA		1984	0-1.500 m s. n. m.
Consumo fresco	Manihoica P-13	ICA		1986	0-1.500 m s. n. m.
Consumo fresco	ICA-Cebucán	ICA-CIAT	CIAT	1990	Piedemonte Llanero
Consumo fresco	ICA-Catumare	ICA-CIAT	CIAT	1990	Piedemonte Llanero y Valles Interandinos
Consumo fresco	ICA-Costeña	ICA-CIAT	CIAT	1991	Costa Atlántica
Consumo fresco	ICA-Negrita	ICA-CIAT	CIAT	1993	Caribe húmedo y seco
Industrial	Corpoica-Colombiana	Corpoica	CIAT	2000	Caribe húmedo (1.100-1.600 m s. n. m.)
Industrial	Corpoica-Sucreña	Corpoica	CIAT	2000	Caribe húmedo (1.100-1.600 m s. n. m.)
Consumo fresco	Corpoica-Caribeña	Corpoica	CIAT	2000	Caribe húmedo (1.400-1.600 m s. n. m.)
Consumo fresco	Corpoica-Rojita	Corpoica	CIAT	2000	Caribe húmedo (1.400-1.600 m s. n. m.)
Consumo fresco	Corpoica-Reina	Corpoica	CIAT	2000	Orinoquía (Piedemonte)
Consumo fresco	Nataima-31	Corpoica	CIAT	2002	Subregión natural valle geográfico del río Magdalena
Industrial	Corpoica-Caiseli	Corpoica	CIAT	2004	Caribe húmedo y Caribe seco
Industrial	Corpoica-Ginés	Corpoica	CIAT	2004	Caribe húmedo y Caribe seco
Industrial	Corpoica-Verónica	Corpoica	CIAT	2004	Caribe húmedo y Caribe seco
Industrial	Corpoica-Tai	Corpoica	CIAT	2004	Caribe seco

(Continúa...)

(Continuación tabla 3.2)

Industrial	Corpoica-Orense	Corpoica	CIAT	2004	Caribe húmedo y Caribe seco
Forrajera	Corpoica SM 1438-2	Corpoica	CIAT	2011	Sabanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba y Magdalena Medio santandereano
Forrajera	Corpoica SM 2625-1	Corpoica	CIAT	2011	Magdalena Medio santandereano
Forrajera	Corpoica SM 2612-24	Corpoica	CIAT	2011	Sabanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba
Forrajera	Corpoica SM 1511-6	Corpoica	CIAT	2011	Sabanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba y Magdalena Medio santandereano
Forrajera	Corpoica SM 2546-40	Corpoica	CIAT	2011	Sabanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba
Forrajera	Corpoica SM 2081-34	Corpoica	CIAT	2011	Sabanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba
Forrajera	Corpoica SM 2769-11	Corpoica	CIAT	2011	Magdalena Medio santandereano
Industrial	Corpoica-Belloti	Corpoica	CIAT	2016	Caribe
Industrial	Corpoica-Ropain	Corpoica	CIAT	2016	Caribe
Industrial	Corpoica-Sinuana	Corpoica	CIAT	2016	Caribe
Industrial	Corpoica-La Francesa	Corpoica	CIAT	2016	Suroccidente de Colombia-departamento del Cauca
Industrial	Corpoica-Cumbre 3	Corpoica	CIAT	2016	Suroccidente de Colombia-departamento del Cauca
Industrial	Corpoica-Melúa-31	Corpoica	CIAT	2019	Orinoquía

Fuente: Elaboración propia

En el año 2004, fueron liberadas variedades con adaptación a la región Caribe (López Montes et al., 2004). Dos de estas variedades son doble propósito: Corpoica-Caiseli (SMB 2446-2) y Corpoica-Orense (CM 9021-2). Junto a estas variedades, se liberaron tres de uso industrial exclusivamente (raíces amargas por su alto contenido de glucósidos cianogénicos): Corpoica-Tai (variedad liberada originalmente en Tailandia con el nombre de Rayong

60), Corpoica-Ginés (CM 4838-1) y Corpoica-Verónica (CM 4919-1). En el año 2011 se realizó la liberación de siete variedades de yuca orientadas al uso forrajero en alimentación animal para la Costa Caribe (Corpoica SM 1438-2, Corpoica SM 2625-1, Corpoica SM 2612-24, Corpoica SM 1511-6, Corpoica SM 2546-40, Corpoica SM 2081-34 y Corpoica SM 2769-11), para las zonas de las sábanas colinadas y planas de Sucre y Córdoba y el Magdalena Medio santandereano; estas variedades presentan una alta producción de follaje de yuca (hojas, pecíolos y ramas tiernas), con un alto valor nutricional, expresado principalmente por el alto contenido de proteína, que supera el 21%, el cual se puede integrar a la dieta de los animales en épocas de limitación de forraje. En el año 2016, después de doce años, fueron liberadas las variedades industriales Corpoica-Belloti (SM 2775-4), Corpoica-Sinuana (SM 1411-5) y Corpoica-Ropain (GM 273-57), tres variedades que muestran una adecuada adaptación a las condiciones del Caribe, buen rendimiento y contenido de materia seca (Rosero et al., 2020); sin embargo, hasta hoy la industria del almidón aún continúa enfrentando un grave problema debido a la estacionalidad del cultivo, lo cual genera grandes pérdidas a los agricultores, ya que variedades actualmente cultivadas no exhiben el potencial de recuperación de materia seca frente a su pérdida en cosecha extendida. En cuanto a oferta de nuevas variedades para el sector productor de yuca del departamento del Cauca, se liberaron las variedades Corpoica-La Francesa (SM 1495-5) y Corpoica-Cumbre 3 (SM 856-11), variedades de alto rendimiento en la producción de almidón y de buena adaptación a las condiciones de la zona intermedia del departamento (Rodríguez et al., 2020). Para la Orinoquía, en el año 2017 se recibió el registro de la variedad Corpoica-Melúa 31 (SM 2792-31), adaptada a esta región, la cual ha demostrado buen rendimiento, alto contenido de materia seca y baja afectación de plagas y enfermedades propias de las condiciones climáticas de esta región.