

CAPÍTULO 12

Mejoramiento de poblaciones de arroz de secano empleando selección recurrente y desarrollo de variedades

*Marc Châtel
Elcio P. Guimarães
Yolima Ospina
Francisco Rodríguez
Victor Hugo Lozano*

Contenido

	Página
Resumen	207
Abstract	208
Introducción	208
Conceptos básicos sobre el método	210
Evolución del trabajo	210
Estrategias de mejoramiento de poblaciones	211
Selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos	212
Selección recurrente basada en líneas $S_{0,2}$	213
Desarrollo de líneas obtenidas de poblaciones mejoradas	214
Trabajo de selección	214
Ensayos de rendimiento	215
Selección de líneas	217
En los programas nacionales	217
En el sector comercial	218
Evaluación de la diversidad genética	221
Consideraciones finales	221
Referencias bibliográficas	222

Resumen

Se describen los nuevos métodos de mejoramiento empleados dentro del proyecto de cooperación para el mejoramiento del arroz entre el CIAT y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), de Francia, el cual busca dos objetivos: seguir produciendo variedades mejoradas y, al mismo tiempo, ampliar la variabilidad del germoplasma que se pone a disposición de los agricultores. Las nuevas estrategias de mejoramiento que se emplean en el arroz de secano son el desarrollo de

poblaciones de amplia base genética y su mejoramiento mediante la selección recurrente. El gen recesivo de androesterilidad (ms), encontrado en un mutante de la variedad IR36, facilitó la creación de poblaciones. Se crearon así poblaciones compuestas para sitios específicos en colaboración con instituciones nacionales de investigación. En Colombia se mejoraron varias poblaciones compuestas empleando dos métodos de selección recurrente. En cada etapa del mejoramiento se seleccionaron algunas plantas fértiles, que se consideraban el punto de partida para el desarrollo de líneas segregantes y fijas mediante el método convencional de selección denominado pedigrí. Desde el año 2002, más del 90% de las líneas que están para selección provienen de las poblaciones recurrentes originales y mejoradas. Las líneas más avanzadas se evalúan actualmente en ensayos de observación y de rendimiento, en cooperación con los socios del proyecto en América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia y Venezuela), América Central (Nicaragua) y el Caribe (Cuba). Ya han sido identificadas algunas líneas promisorias, que podrán convertirse en variedades comerciales.

Abstract

Improving upland rice populations using recurrent selection and varietal development

The new breeding methods used by the collaborative rice improvement project carried out by CIAT and the French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD) are described: development of populations with a broad genetic base and recurrent selection. This project aims to continue to develop improved varieties while broadening the variability of germplasm available to farmers. A recessive male-sterile gene (ms) found in a mutant of variety IR36 facilitated the development of the rice population. Site-specific composite populations were developed with the national agricultural research institutes. In the case of Colombia, several composite populations were improved using two methods of recurrent selection. Several fertile plants were selected at each breeding stage and then used as a starting point to develop segregating and fixed lines using the conventional pedigree method. Since 2002, more than 90% of the lines in the selection process have come from original and improved recurrent populations. The most advanced lines are currently being evaluated in observation nurseries and yield trials in collaboration with different project partners in South America (Argentina, Bolivia, Brazil, Colombia, and Venezuela), Central America (Nicaragua), and the Caribbean (Cuba). Several promising lines, which could become commercial varieties, have been identified.

Introducción

Los métodos clásicos de mejoramiento genético fueron (y todavía lo son) responsables del desarrollo y de la liberación de numerosas variedades de arroz de secano en varios países de América Latina, como Bolivia, Brasil y Colombia (INGER, 1991). Aunque esos resultados fueron muy positivos, condujeron al estrechamiento de la base genética de los productos de mejoramiento que se ofrecían a los

agricultores (Cuevas-Pérez et al., 1992; Rangel et al., 1996; Montalván et al., 1998). Por consiguiente, las instituciones como el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), establecido en Colombia, y el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD), con sede en Francia, se han aplicado a la tarea de hallar nuevos métodos de mejoramiento que permitan lograr dos objetivos: uno, seguir produciendo variedades, y otro, al tiempo con el primero, ampliar la

variabilidad del germoplasma que se pone a disposición de los agricultores.

Desde 1996, el trabajo realizado dentro del convenio entre el programa de arroz del CIAT y el CIRAD (proyecto CIRAD/CIAT) ha aplicado la estrategia de disminuir la producción de líneas fijas —directamente relacionadas con el mejoramiento clásico por cruzamientos entre una línea (o variedad) del grupo japónica con otra del mismo grupo (japónica x japónica)— y de sustituirla, incrementando los recursos necesarios, por la ampliación de la base genética del arroz de secano y por el mejoramiento por el método de poblaciones (Châtel et al., 2001).

Para lograr ese objetivo del proyecto, los investigadores crearon poblaciones de amplia base genética (Châtel y Guimarães, 1998), que han sido mejoradas empleando la metodología de la selección recurrente. Para facilitar la tarea de construir y recombinar al azar los diferentes progenitores que constituyen las poblaciones dichas, se utilizó el gen recesivo de androesterilidad (ms) hallado en un mutante de la variedad IR36 de tipo índica (Singh e Ikehashi, 1981).

Si se explora la amplia variabilidad genética presente en esas poblaciones, resultarán variedades de base genética distinta de las que están hoy disponibles en el mercado latinoamericano. A ese resultado se llegará mediante la selección de plantas individuales y empleando métodos de mejoramiento como el de pedigrí, el masal, el masal modificado (ver Capítulo 9 de esta obra) o una combinación de éstos, en todas las etapas del proceso de mejoramiento de las poblaciones. El proyecto ha desarrollado en Colombia una serie de

líneas segregantes; las más avanzadas están bajo evaluación en ensayos de rendimiento en varios países que tienen un ecosistema apto para el arroz de secano. Se presentan enseguida algunos resultados obtenidos en las diferentes etapas de la estrategia del proyecto CIRAD/CIAT antes mencionada:

- Han aumentado paulatinamente, desde 1997, las líneas desarrolladas por mejoramiento poblacional; en el 2002, más del 90% de las líneas fijas evaluadas y seleccionadas provenían de poblaciones que se estudiaban mediante el método de la selección recurrente.
- Para apoyar la labor de los países de la región, se crearon diversas poblaciones que fueron luego enviadas a los programas nacionales (Châtel y Guimarães, 1998), además de las líneas segregantes seleccionadas en Colombia; los socios colaboradores en esta estrategia son Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Nicaragua y Venezuela.
- China se interesó en la metodología descrita y en los materiales de secano obtenidos; se enviaron, por tanto, varias líneas y algunas poblaciones al Food Crops Research Institute, situado en la provincia de Yunnan (Tao et al., 2000).
- Cuba, en el Caribe, y otros países han solicitado poblaciones específicas para solucionar problemas locales (Polanco et al., 2000).

En este capítulo se hace un informe del uso que se da a la estrategia de mejoramiento 'poblacional' y de los avances logrados en el ecosistema de sabanas por el proyecto de arroz de secano manejado en colaboración por el CIRAD y el CIAT.

Conceptos básicos sobre el método

El mejoramiento de poblaciones por selección recurrente es un método eficiente para mejorar características cuantitativas y de baja heredabilidad; para mejorar otros caracteres de herencias más simples, hay metodologías más eficientes. El método permite lograr dos resultados positivos:

- Romper los bloques de ligamiento génico que, en el arroz, se constituyeron durante muchos años de selección y autofecundación.
- Liberar variabilidad genética mediante ciclos sucesivos de cruzamientos (o sea, por las recombinaciones).

La continua selección, generación tras generación, de los caracteres que interesan (al fitomejorador y al productor) conduce a la acumulación de genes favorables a la expresión de esos caracteres objeto de mejoramiento, es decir, a un incremento de la frecuencia génica. Puesto que este proceso acumulativo es paulatino, los resultados del método se esperan a mediano o a largo plazo, tiempo que requiere la mejora genética de las poblaciones. Se han comunicado innumerables ejemplos de la eficiencia del método, principalmente en cultivos de polinización abierta como el maíz (Jenkins, 1940) y en algunos cultivos autógamos como la soya (Piper y Fehr, 1987; Guimarães, 1985), el trigo (Altman y Busch, 1984), el algodón (Meredith y Bridge, 1971; Miller y Rawlings, 1967) y la cebada (Bajaj et al., 1990).

Puesto que hay un gen recesivo de androesterilidad en la población, ésta se comporta, en principio, como un cultivo de polinización abierta. En la floración, el polen producido por las plantas fértiles autopoliniza sus flores y, al mismo tiempo, poliniza las plantas

androestériles presentes a su alrededor. Se libera así una gran cantidad de variabilidad porque se combinan varios progenitores en una misma población segregante. En general, en las etapas iniciales del proceso de mejoramiento, esas poblaciones tienen un alto nivel de segregación respecto a una gran cantidad de características; en la medida en que se avanza en el proceso, algunas características (las de control genético más simple) se fijan rápidamente y la población se vuelve más uniforme.

Se dispone, por tanto, de cierta variabilidad genética en cada generación segregante del proceso de mejoramiento poblacional; para aprovecharla, los fitomejoradores seleccionan plantas fértiles, con las cuales iniciarán un proceso de desarrollo de líneas mediante alguno de los siguientes métodos del mejoramiento clásico: el de pedigrí, el masal o el masal modificado. En este capítulo se informará sobre algunos resultados de la evaluación de poblaciones y de las líneas obtenidas empleando esos métodos.

Una de las responsabilidades del proyecto CIRAD/CIAT es el registro y la preservación de las poblaciones de arroz que existen en la región latinoamericana; para cumplirla, sus investigadores llevan al campo, cada año, algunas poblaciones sólo con el fin de cosechar las plantas androestériles recombinadas al azar. Esta tarea constituye una etapa de mantenimiento de la población. Actualmente hay poblaciones registradas (Châtel y Guimarães, 2000) que están disponibles para cualquier fitomejorador o institución interesado.

Evolución del trabajo

El objetivo principal del proyecto CIRAD/CIAT de mejoramiento poblacional del arroz de secano para el ecosistema de sabana es desarrollar, adaptar y mejorar

varias poblaciones de arroz del grupo japónica tropical. La evolución del proyecto ha sido la siguiente:

- Las primeras poblaciones de arroz de secano de América Latina fueron creadas (Taillebois y Guimarães, 1989) por el proyecto integrado por Embrapa-Arroz e Feijão, de Brasil, y el CIRAD (el IRAT, en ese tiempo), el cual duró hasta 1991.
- En 1992 se inicia el proyecto CIRAD/CIAT, en Colombia, y se introducen en este país, desde Brasil, las poblaciones básicas CNA-IRAT 5 y CNA-IRAT A. Estas poblaciones fueron sembradas en la Estación Experimental La Libertad (LL), cuyos suelos son ácidos, para determinar las capacidades y la adaptación de ese germoplasma a las condiciones de la sabana colombiana. Las observaciones de Guimarães et al. (1995) indicaron que la CNA-IRAT A era la población que, dado su potencial, se acercaba más a lo esperado; sin embargo, no poseía la variabilidad genética deseada para los objetivos prioritarios del proyecto.
- Se creó entonces una población de sitio específico, o sea, una población que, además de poseer una base genética más amplia, llevara genes de líneas élite seleccionadas localmente y dotadas de los caracteres que interesaban al proyecto. La creación de esa nueva población (PCT-4), que resultó de la introducción de variabilidad en CNA-IRAT A, y la estrategia empleada para constituirla fueron descritas por Châtel et al. (1997b). La PCT-4 fue luego utilizada como germoplasma básico para crear la población PCT-11 (Ospina et al., 2000).
- Mientras se desarrollaban las poblaciones mencionadas, se ponía en práctica la estrategia de mejorar

las poblaciones del germoplasma introducido respecto a dos características prioritarias: la resistencia a la piricularia de la hoja y la tolerancia al virus de la hoja blanca (VHB), transmitido por el insecto *Tagosodes orizicolus* (Châtel et al., 1997a).

- En los últimos años, el mejoramiento de poblaciones que emplea la selección recurrente se concentró en las poblaciones desarrolladas en Colombia (PCT-4 y PCT-11) y en la CNA-7, desarrollada en Brasil; esta última presenta un tipo de planta bien adaptado al cultivo manual practicado por pequeños productores; por ejemplo, los de Bolivia.
- Al tiempo con ese trabajo, se investigó el germoplasma del proyecto como fuente de variabilidad genética, con el fin de generar líneas fijas que pudieran distribuirse entre los programas nacionales; éste es uno de los objetivos del proyecto colaborativo para la región latinoamericana. De ese germoplasma se seleccionaron plantas individuales para generar líneas segregantes, y éstas fueron seleccionadas empleando el método del pedigrí.

Estrategias de mejoramiento de poblaciones

El método de selección recurrente implica un proceso cíclico continuo que consta de tres etapas básicas:

- Selección de plantas o familias (unidades de selección).
- Evaluación de las unidades de selección.
- Recombinación de las mejores plantas o familias (unidades de recombinación).

En este proyecto se emplearon dos unidades de selección: las plantas S_0 y las progenies o familias $S_{0,2}$. El objetivo

era mejorar las poblaciones, y se aplicaron dos estrategias:

- La primera estrategia se basa en la *selección recurrente fenotípica* masal en ambos sexos. Las plantas S_0 de cada ciclo de recurrencia son las unidades de selección y, al mismo tiempo, las unidades de recombinación. En cada ciclo se requiere, por tanto, una sola siembra de la población, pero ésta debe hacerse en el sitio donde haya presión para que se expresen los caracteres que se desea mejorar.
- La segunda estrategia requiere la *evaluación de familias*. Las plantas fértiles S_0 se seleccionan durante la época regular de cultivo que, en Colombia y en la estación LL, va de marzo a septiembre. Una parte de la semilla S_0 se guarda y la otra parte se siembra para obtener la generación $S_{0:1}$; ésta se hace avanzar, durante el periodo de octubre a febrero, en la estación experimental del CIAT-Palmira (EP). La semilla $S_{0:2}$ se cosecha en la EP y se siembra en la estación LL en la siguiente época de cultivo (marzo-septiembre). Las líneas $S_{0:2}$ son evaluadas y se comparan con tres testigos. Se emplea, generalmente, el diseño experimental de bloques aumentados propuesto por Federer en 1956 (BAF). Después de la evaluación (siguiente semestre), la semilla de las plantas S_0 , que ha dado origen a las mejores familias $S_{0:2}$, y que había sido guardada, se recombina. De este modo, cada ciclo de recurrencia se completa en cuatro cultivos (dos en la época normal de cultivo y dos en la época intermedia o de 'mitaca'), es decir, tarda 2 años.

Selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos

Las poblaciones PCT-4, PCT-A y PCT-5 fueron sometidas a tres ciclos de selección recurrente fenotípica masal en ambos sexos respecto a dos características: resistencia a la piricularia de la hoja y resistencia al virus de la hoja blanca (VHB). La metodología empleada consistió en evaluar y seleccionar, durante todo el desarrollo de las plantas (desde la germinación hasta la floración), aquellas plantas que demostraban fenotípicamente resistencia a las dos enfermedades. La planta que presentaba alguna reacción susceptible, en cualquier etapa de su desarrollo, era eliminada del campo desde el momento en que se observaban los síntomas.

Puesto que solamente las plantas sanas lograban llegar a la cosecha, la selección incluyó los dos sexos, es decir, solamente las plantas fértiles sanas polinizaban las plantas androestériles vecinas, también sanas. El proceso de mejoramiento de poblaciones debía considerar muchos caracteres para tener mayor posibilidad de interesar a los programas nacionales; por consiguiente, se cosecharon solamente las plantas androestériles que cumplían con unos requisitos agronómicos mínimos. Además, los resultados de esta estrategia indicaron (Ospina et al., 2000) que sólo un ciclo de selección era suficiente para reducir significativamente el número de plantas enfermas en las poblaciones mejoradas del ciclo siguiente.

Teniendo en mente el desarrollo de líneas y la comparación de las estrategias de selección, en 1999 y después de tres ciclos de selección recurrente masal respecto a la resistencia al VHB, se evaluaron en la EP 107 líneas $S_{0:2}$ de las tres poblaciones. Los resultados de esa

evaluación (Cuadro 1) muestran lo siguiente:

- De esas líneas, que se originaron en las poblaciones de amplia base genética y se hallaban en proceso de mejora mediante la selección recurrente, 54.2% se mostraron resistentes al VHB.
- Estos resultados son comparables a los obtenidos por otros programas de mejoramiento que aplican métodos clásicos a las plantas autóгамas.

Las líneas generadas por el proyecto se diferencian de las convencionales en su base genética más amplia. Esta afirmación se basa solamente en el número y en el origen de los progenitores involucrados en los cruces de los que provienen las poblaciones, ya que en esta etapa del trabajo no se dispone todavía de herramientas más precisas, como los marcadores moleculares que permiten comparar la base genética de los distintos materiales.

Las poblaciones que recibieron el mejoramiento poblacional y las líneas derivadas de ellas fueron puestas a disposición de los programas nacionales, para que utilicen su variabilidad genética y aprovechen el mejoramiento logrado en las dos características (resistencia a piricularia y al VHB), que son prioritarias para el cultivo del arroz en América Latina.

Durante la época de cultivo del 2001, las tres poblaciones mejoradas fueron sembradas en la estación LL, y de ellas se seleccionaron plantas S_0 para desarrollar, mediante el método del pedigrí, varias líneas mejoradas.

Selección recurrente basada en líneas $S_{0:2}$

La población PCT-4 es una población de sitio específico creada en Colombia para las sabanas de suelos ácidos (Ospina et al., 2000). Esta población fue mejorada mediante selección recurrente basada en la evaluación de la

Cuadro 1. Evaluación de la resistencia al virus de la hoja blanca (VHB) en las líneas S_2 de las poblaciones de arroz PCT-5, PCT-A y PCT-4, en la EP (CIAT-Palmira), en Colombia, 1999.

Líneas S_2	Líneas (%) con reacción al VHB (escala 1-9)		
	Resistente (1-3)	Intermedia (5)	Susceptible (7-9)
En poblaciones mejoradas	54.2	42.9	2.8
Líneas de Fedearroz ^a	59.1	30.6	10.2
Líneas del ICA ^a	51.4	4.0	44.4
Líneas del IRRI ^a	5.6	4.6	89.7
Colombia 1 (testigo resistente)	90.3	9.7	0
Blue Bonnet (testigo susceptible)	0	3.8	96.2
CICA 8 (testigo intermedio)	0	86.4	13.6

- a. Fedearroz = Federación de Arroceros de Colombia; ICA = Instituto Colombiano Agropecuario; IRRI = Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz, Los Baños, Filipinas.

descendencia $S_{0:2}$; el trabajo incluía los pasos siguientes:

- **Población PCT-4 mejorada en tres ciclos de selección recurrente.** Desde 1995 y hasta la fecha, la población PCT-4 fue sometida a tres ciclos de selección recurrente para obtener la población identificada como PCT-4\SA\1\1,SA\1,SA\1 (Ospina et al., 2000).
- **Población PCT-4 mejorada en un ciclo de selección seguido de tres recombinaciones.** Para averiguar si las recombinaciones sucesivas tras una selección tenían algún efecto en la población resultante, se decidió, después del primer ciclo de selección recurrente respecto al suelo ácido (\SA), hacer lo siguiente:
 - recombinar tres veces (\SA\3) la población PCT-4;
 - sembrar en la estación LL, en el año 2000, las semillas S_0 de la población que se obtuvo (PCT-4\SA\3\1);
 - seleccionar en la EP, en el 2001, las mejores 240 plantas fértiles $S_{0:1}$ y hacerlas avanzar a la generación $S_{0:1}$ (semillas $S_{0:2}$);
 - sembrar en la estación LL, en el 2002, esas 240 líneas $S_{0:2}$, aplicando el diseño BAF con tres testigos.

Después de evaluadas las líneas $S_{0:2}$ de las dos poblaciones anteriores, entre las mejores de ellas (según los resultados del ensayo) se seleccionó el 30%. Estas líneas mejores fueron recombinadas empleando la semilla remanente de las plantas S_0 , es decir, las semillas $S_{0:1}$. Así se completó el ciclo de selección recurrente.

Una vez obtenidas las poblaciones mejoradas empleando los dos métodos anteriores, se hizo una comparación del comportamiento de las líneas extraídas

de ambas poblaciones; actualmente se está evaluando el avance genético que posiblemente se obtuvo.

Desarrollo de líneas obtenidas de poblaciones mejoradas

Las plantas que se extraen de las poblaciones manejadas mediante la selección recurrente se desarrollan como líneas segregantes. Este trabajo es parte importante de la estrategia general del proyecto, que incluye suministrar a los programas nacionales algunos materiales para que ellos seleccionen los de su interés y los terminen en las localidades.

Trabajo de selección

Consiste este trabajo en escoger plantas fértiles de todas las fuentes de variabilidad que se presenten durante las etapas del mejoramiento poblacional. Estos genotipos son el punto de partida del desarrollo de líneas promisorias, de futuras variedades o de progenitores potenciales en los programas de mejoramiento genético.

Los resultados del trabajo de los últimos 3 años se materializaron en la siembra del 2004 en la estación LL: allí se seleccionaron 553 plantas fértiles, se pusieron bajo selección 1599 líneas segregantes y se hicieron 74 selecciones masales que representan las líneas más avanzadas. Estos materiales provienen de diferentes poblaciones y generaciones, como se muestra en el Cuadro 2.

Las generaciones avanzadas representan las líneas fijas que pasaron por todo el proceso agronómico de selección y evaluación en las localidades, tanto de Colombia como de otros países. Las mejores líneas conformaron los viveros internacionales de observación (ION); éstos se distribuyeron a los socios colaboradores del proyecto, quienes iniciaron el trabajo de adaptación de los materiales.

Cuadro 2. Líneas segregantes que provienen de diferentes poblaciones de arroz de secano y que fueron evaluadas en la estación LL, en Villavicencio, Colombia, en el 2004.

Generación	Población	Selecciones (no.):	
		De plantas fértiles	Masales
S ₁	CNA-7\Bo\3\1	140	
	PCT-11\0\0\2, Bo\3	204	
	PCT-4\SA\1\1, Bo\3	209	
	Total	553	
S ₂	PCT-4\0\0\1>...	29	
	PCT-4\SA\7\1>...	47	
	PCT-4\SA\1\1,SA\4\1>...	46	
	PCT-4\SA\1\1,Bo\2\1>...	69	
	PCT-11\0\0\2,Bo\2\1>...	167	
	CNA-7\Bo\2\1>...	9	
Total	367		
S ₃	PCT-4\SA\1\1,SA\3\1>	175	
	PCT-4\SA\6\1>...	55	2
	PCT-4\SA\1\1,Bo\2\1>	39	
	PCT-11\0\0\2,Bo\2\1>	303	15
	CNA-7\Bo\2\1>	9	
Total	581	17	
S ₄	PCT- 7		
	5\PHB\1\0,PHB\1,PHB\1,PHB\1	134	
	PCT-4\SA\1\1,SA\2\1>	238	
	PCT-4\SA\5\1>	42	
	PCT-4\SA\1\1,Bo\1\1>	46	
	PCT-11\0\0\2,Bo\1\1>	41	
CNA-7Bo\1\1>			
Total	508		
S ₅	PCT-4\SA\4\1>	132	
	Total	132	
S ₆ y S ₇		6	7
		5	24
			5
			8
			6
			7
Total	11	57	

Ensayos de rendimiento

Estos ensayos se siembran, en general, en un suelo ácido que se fertiliza con los productos siguientes:

- 300 kg/ha de cal dolomítica, aplicados 30 días antes de la siembra.

- 178 kg/ha de nitrógeno, fraccionados en tres aplicaciones de 59 kg/ha cada una, así: una a los 20, otra a los 35 y otra a los 45 días después de la siembra.
- 155 kg/ha de fósforo, al momento de la siembra.
- 116 kg/ha de potasio, fraccionados en tres aplicaciones, así: la primera mitad

(58 kg/ha) al momento de la siembra, y la segunda mitad en dos porciones de 29 kg/ha cada una, a los 20 y a los 35 días después de la siembra.

No se aplica ningún control químico de enfermedades; si aparecen insectos dañinos, se aplican insecticidas químicos (sólo si es necesario hacerlo). Se emplea un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Se evalúan las principales características agronómicas de las plantas y se cosechan todas las parcelas para calcular el rendimiento.

Ensayos y testigos

Tanto en la época de cultivo del 2000 como en la del 2001 se sembró un ensayo de rendimiento en la estación LL. En ambos ensayos, las líneas más prometedoras del proyecto se compararon con tres testigos comerciales provenientes del mejoramiento tradicional: Oryzica Sabana 6, liberada en 1992 (Leal et al., 1991), Oryzica Sabana 10, liberada en 1994, y la 'Línea 30' (CIRAD 409), liberada en el 2004. Se evaluaron 24 líneas avanzadas seleccionadas después del primer ciclo de mejoramiento mediante selección recurrente de la población PCT-4.

Resultados

Las líneas ensayadas presentaron, en los 2 años dichos, un rendimiento de grano que variaba entre 2000 y 3488 kg/ha. Los testigos Oryzica

Sabana 10, Oryzica Sabana 6 y Línea 30 (CIRAD 409) rindieron 2000, 2633 y 2931 kg/ha, respectivamente.

El análisis de los resultados de ambos años indicó lo siguiente:

- De las tres líneas identificadas anteriormente como las más prometedoras, una confirmó su excelente comportamiento: la línea PCT-4\SA\1\1>975-M-2-M-3, que rindió 19%, 32% y 74% más que CIRAD 409, Oryzica Sabana 6 y Oryzica Sabana 10, respectivamente. Tiene la misma precocidad que el testigo más precoz, CIRAD 409.
- Del ensayo del año 2000 se concluyó que era posible romper la correlación existente entre precocidad y potencial de rendimiento.
- De las 24 líneas, 12 dieron un rendimiento igual al mejor testigo (CIRAD 409). Hay, por tanto, nuevos materiales que reemplazarían a CIRAD 409 porque tienen el mismo nivel de rendimiento y de precocidad; se ofrece así, por tanto, una posibilidad de diversificación a los productores.
- La mejor línea, PCT-4\SA\1\1>975-M-2-M-3, además de superar en rendimiento a las otras, no presenta variación anual grande en el rendimiento (a diferencia de los tres testigos), lo que indicaría que es más estable en el tiempo (Cuadro 3).

Cuadro 3. Líneas destacadas en los ensayos de rendimiento de los años 2000 y 2001 en la estación LL, en Villavicencio (Meta), Colombia.

Línea destacada	Rendimiento (kg/ha) en:			Días a floración
	2000	2001	Promedio	
PCT-4\SA\1\1* >975-M-2-M-3	3644	3333	3488	71
Línea 30 (CIRAD 409)	2332	3531	2931	71
Oryzica Sabana 6	2140	3126	2633	83
Oryzica Sabana 10	1240	2770	2000	89

* PCT-4\SA\1\1: esta nomenclatura indica una selección para suelos ácidos (SA), seguida de una recombinación, y esto corresponde a un ciclo de selección recurrente.

En el 2002, en colaboración con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), se repitió el ensayo cinco veces en sitios diferentes: dos veces en la estación LL y otras tres en distintas fincas situadas en la sabana de la Altillanura plana de los Llanos Orientales de Colombia.

Selección de líneas

El proyecto CIRAD/CIAT proporciona a los fitomejoradores de la región latinoamericana la oportunidad de seleccionar líneas en las poblaciones de arroz que están aún en proceso de mejoramiento.

En los programas nacionales

En el 2000, con la colaboración de Embrapa-Arroz e Feijão, se organizó el Primer Taller Internacional de Selección de Arroz de Secano, en Villavicencio, Colombia. En el 2002 se reunió el Segundo Taller sobre el mismo tema en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, organizado por el CIAT-Santa Cruz. El Tercer Taller tuvo lugar en Colombia, en el 2003 (CIAT, 2003).

Los objetivos de los tres eventos fueron los siguientes:

- Promover la integración de los mejoradores de arroz de secano de la región.
- Compartir la experiencia adquirida en el manejo de poblaciones segregantes y en el desarrollo de líneas fijas para el ecosistema de sabana y sus variantes.
- Seleccionar, en el campo experimental, líneas que serían introducidas más adelante en los países participantes.
- Entrenar fitomejoradores en el manejo del método de selección recurrente.

En estos talleres participaron fitomejoradores de Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Honduras, Nicaragua y Venezuela.

En el Primer Taller, por ejemplo, las actividades de selección de líneas realizadas por los investigadores participantes (Cuadro 4) fueron las siguientes:

- Se seleccionaron (según el participante) del 8% al 21% del total de las líneas.
- Colombia, Brasil y Bolivia seleccionaron más líneas que los otros países.
- La selección se basó en las siguientes características relevantes: precocidad, tipo moderno de planta (o sea, pocas macolla y arquitectura erecta), granos largos y finos (de especial interés para Brasil), resistencia a piricularia y buen potencial de rendimiento.

Eventos de este tipo, que deberían repetirse rutinariamente, son un elemento clave de la estrategia del proyecto, por las siguientes razones:

- Mantienen alta la motivación del grupo de fitomejoradores.
- Permiten a los participantes avanzar en sus conocimientos técnicos.
- Mantienen el proyecto actualizado respecto a las necesidades y solicitudes de los programas nacionales.
- Facilitan la selección de los materiales que serán introducidos en los diferentes países.

Los talleres de selección participativa antes descritos, en los que interviene un panel de fitomejoradores, son muy útiles para los participantes porque:

- Cada participante se informa bien de las actividades de sus colegas.
- Los mejoradores conocen mejor que otros profesionales la oferta que hace el proyecto de mejoramiento de arroz de secano CIRAD/CIAT.

Cuadro 4. Líneas seleccionadas (número y porcentaje) por los fitomejoradores durante el Primer Taller Internacional de Selección de Arroz de Secano reunido en la estación LL, en Villavicencio, Colombia (7-11 de agosto de 2000).

Generación	Líneas	Líneas seleccionadas (no. y %) en:					
		Bolivia	Brasil	Colombia	Cuba	Venezuela	Argentina ^a
S ₁	229	14 6%	10 4.4%	14 6.1%	14 6.1%	5 2.2%	14 6.1%
Promedio: 11.8 líneas		Intensidad de selección: 5.1%					
S ₂	237	0	8 3.4%	15 6.3%	0	14 5.9%	0
Promedio: 6.2 líneas		Intensidad de selección: 2.6%					
S ₄	7	0	1 14.3%	3 43%	0	2 28.6%	0
Promedio: 1 línea		Intensidad de selección: 14%					
S ₆	289	61 21.1%	52 18%	133 46%	47 16.2%	33 11.4%	61 21.1%
Promedio: 64.5 líneas		Intensidad de selección: 22%					
S ₇	78	4 5.1%	20 25.6%	15 19.2%	3 3.4%	8 10.3%	4 5.1%
Promedio: 9 líneas		Intensidad de selección: 11.5%					
S ₉	307	41 13.3%	66 21.5%	56 18.2%	38 12.3%	30 9.8%	41 13.3%
Promedio: 45.3 líneas		Intensidad de selección: 14.8%					
Total:	1147	120 10.5%	157 13.7%	236 20.6%	102 8.8%	92 8%	120 10.5%
Promedio: 137.8 líneas		Intensidad de selección: 12%					

a. Las líneas seleccionadas por Argentina son idénticas a las seleccionadas por Bolivia. Los mejoradores de Bolivia entrenaron a los de Argentina, quienes empiezan a trabajar en mejoramiento de arroz de secano.

- La selección *in situ* que hace cada participante le permite apropiarse más fácilmente del material seleccionado.
- La selección que haga el pánel de fitomejoradores es una contribución muy valiosa para la región latinoamericana, ya que el proyecto CIRAD/CIAT pertenece al ámbito regional.
- Los miembros del proyecto pueden conocer mejor el tipo de material que seleccionó cada participante y los criterios con que se consideró el material vegetal.

En el sector comercial

Colombia y Bolivia compartieron la selección de la primera variedad comercial de arroz de secano que se originó en el mejoramiento poblacional (Taboada et al., 2003). El CIAT-Santa Cruz y el sector arrocero privado de Bolivia lanzaron la nueva variedad comercial en el 2006.

Arroz en Bolivia

La importancia del arroz es indiscutible en Bolivia. Es un producto de la canasta familiar básica y su consumo sigue en

aumento: actualmente se acerca a 35 kg per cápita. Se emplean en Bolivia dos sistemas de producción:

- El sistema mecanizado convencional que, en el departamento de Santa Cruz, cubre un área de aproximadamente 75% del total sembrado en Bolivia, y aporta el 80% de toda la producción del país.
- El sistema de ‘tumba y quema’ (siembra manual), que se aplica en casi toda el área cultivada de los demás departamentos productores del país.

Todo el arroz producido se destina al mercado interno o al autoconsumo.

El crecimiento del sector arrocero boliviano está limitado por la falta de variedades más productivas para cada sistema de cultivo (secano manual y secano mecanizado). Por ello, el programa de mejoramiento genético de arroz del CIAT-Santa Cruz ha estado buscando nuevas variedades, adaptadas y productivas, para liberarlas a los agricultores. Estableció, por tanto, una colaboración con el proyecto de mejoramiento de poblaciones de arroz de secano CIRAD/CIAT, con sede en Colombia, y en ese trabajo colaborativo se identificó una nueva variedad adaptada tanto al sistema manual de los pequeños productores como al sistema mecanizado.

La nueva variedad, cuyo registro numérico es SR 99343, es una línea del proyecto CIRAD/CIAT proveniente del mejoramiento de poblaciones de arroz, que fue seleccionada en la estación LL, en Colombia, en el primer ciclo de recombinación de la población PCT-4.

Línea seleccionada

Se seleccionaron varias líneas segregantes por el método del pedigrí, y la línea avanzada PCT-4\0\0\1>S2-1584-4-M-5-M-6-M-M se envió a Bolivia para ser evaluada a nivel local. En el CIAT-Santa Cruz, de Bolivia, la línea recorrió todo el proceso de evaluación en ensayos agronómicos, y fue considerada línea promisoría bien adaptada a ambos sistemas de producción de arroz, el manual y el mecanizado.

En el Cuadro 5 se presentan sus características agronómicas. El potencial de rendimiento observado en las pruebas de eficiencia del 2003, en ambos sistemas de producción, se presenta en el Cuadro 6. Los principales descriptores de la nueva variedad y su reacción a las principales enfermedades se consignan en el Cuadro 7.

Las siguientes características de la línea benefician a los *pequeños agricultores*:

- La precocidad asociada a un buen potencial de rendimiento, porque

Cuadro 5. Características agronómicas evaluadas en el Ensayo de Adaptación Regional, en CIAT-Santa Cruz (Bolivia), en el verano de 2002-2003.

	Días a floración	Altura planta (cm)	Vigor (1 a 5)	Longitud grano (mm)	Peso 1000 granos (g)	Grano excelso (%)	Centro blanco (1 a 9)	Temperatura de gelatinización
Línea SR 99343	85	96	1	7.05	32.3	49.4	1.7	Alta
Testigos								
Jasayé	100	108	1	6.82	36.1	56.4	4.1	Media
Tutuma	93	104	3	6.73	26.6	47.7	1.8	Alta

Cuadro 6. Prueba de eficiencia de la línea mejorada y de siete testigos, tanto en condiciones de secano manual como de secano mecanizado, en CIAT-Santa Cruz (Bolivia).

	Rendimiento (kg/ha)	
	En secano manual	En secano mecanizado
Línea SR 99343	4706	4662
Testigos		
Jacuú	4861	
Jisunú	4115	
Cheruje	3948	
Jasayé	3713	
Tapeque	3102	
Tari		5380
Epagri 109		4633

Cuadro 7. Características de la nueva variedad CIAT-Santa Cruz (Bolivia).

Características agronómicas	Valor o calificación
Rendimiento (kg/ha, promedio)	4091
Vigor de la plántula	Vigorosa
Días a floración	90
Días a maduración	120
Altura de planta (cm)	112
Acame o vuelco	Resistente
'Exerción' de la panícula	Emergida
Longitud de la panícula (cm)	22.8
Granos/panícula	161
Maduración (%)	82.7
Desgrane	Resistencia moderada
Respecto a enfermedades	
Piricularia en la hoja	Resistente
Piricularia en la panícula	Resistente
Helminthosporiosis	Moderada resistencia
Escaldado de la hoja	Moderada resistencia
Manchado del grano	Resistente
Respecto al grano	
Pubescencia de la semilla	Ausente (semilla lisa)
Peso de 1000 granos (g)	32.2
Largo del grano limpio (mm)	7.60
Ancho de grano limpio (mm)	2.75
Relación largo/ancho	2.76
Temperatura de gelatinización	Alta
Tipo de grano	Largo
Centro blanco (1-9)	1.8
Calidad visual	Buena

favorece la rotación de cultivos en un mismo lote durante el mismo año de cultivo.

- La precocidad, porque permite comercializar la cosecha a un mejor precio en una época más temprana del año cuando no hay arroz en el mercado.

A los *productores* del sistema mecanizado los favorecen el buen tipo de planta y el grano largo, dos características preferidas por la industria arrocera.

Evaluación de la diversidad genética

La exploración de la amplia variabilidad genética presente en las poblaciones obtenidas por selección recurrente debe conducir a la liberación de variedades cuya base genética sea distinta y más amplia que la de las variedades actualmente disponibles en el mercado latinoamericano. Este resultado vendrá, como se ha indicado, de la selección de plantas mediante métodos como el de pedigrí, el masal, el masal modificado o alguna combinación de ellos, en todas las etapas del proceso de mejoramiento poblacional.

El proyecto ha desarrollado así una serie de *líneas segregantes*, de las cuales las más avanzadas se están evaluando en ensayos de rendimiento en un ecosistema apto para el cultivo de secano, en Colombia. Los resultados de estos ensayos indican, además, que es posible romper la correlación existente entre precocidad y potencial de rendimiento.

Por su parte, las herramientas de la *biotecnología* (por ejemplo, los marcadores moleculares) deberían contribuir a esta evaluación de varias maneras:

- Permitiendo evaluar la diversidad genética de las líneas desarrolladas a partir de poblaciones, comparándola con la de las variedades comerciales de arroz de secano ya existentes en América Latina.
- Averiguando la forma en que evolucionó la diversidad genética a través de los diferentes ciclos de inter cruzamiento, con la intención de definir el número adecuado de recombinaciones de los alelos de los progenitores (alelos 'parentales'), tanto durante el desarrollo de las poblaciones como durante el mejoramiento de éstas por selección recurrente.
- Midiendo el efecto que puede tener el gen de androesterilidad presente en el mutante de IR36, en la frecuencia de otros alelos de la población. Este punto es de sumo interés para el proyecto.

Consideraciones finales

El proyecto CIRAD/CIAT para el mejoramiento del arroz de secano culminó una de las etapas de su estrategia inicial, es decir, desarrollar y poner a disposición de los fitomejoradores de la región latinoamericana *poblaciones de amplia base genética*. Para conocer mejor la forma en que funciona en el cultivo del arroz la metodología empleada y poder entrenar a algunos investigadores de América Latina, se trabajó con tres poblaciones empleando dos métodos de selección recurrente: el masal y el que se basa en familias. Ese germoplasma es, además, fuente de genotipos con elevada frecuencia génica para dos caracteres (resistencia a piricularia y resistencia al VHB) que fueron sometidos a presión de selección.

Se mantiene todavía la posibilidad, que fue parte del proyecto original, de generar

líneas fijas cuya base genética sea distinta de la que está presente en las variedades comerciales de la región. El propósito es ofrecer a los programas nacionales de arroz alternativas en el lanzamiento de nuevas y mejores variedades. Este material se entrega cuando se distribuyen los viveros de líneas avanzadas denominados CIAT-ION (viveros internacionales de observación manejados por el CIAT). Para desarrollar esas líneas, se aprovecharon todas las etapas del proceso de selección recurrente y se extrajeron de ellas plantas fértiles que fueron seleccionadas por el método del pedigrí.

Están en la etapa final de evaluación varias *líneas avanzadas* de la población PCT-4 que presentaron, a lo largo de los últimos 3 años, un rendimiento y un comportamiento agronómico interesantes. Una de esas líneas supera actualmente el rendimiento del mejor testigo en casi un 20%. Las líneas tienen, además de las características indicadas de interés primario para el productor, una base genética diferente.

En los *próximos años*, el proyecto continuará trabajando en cuatro direcciones:

- Crear poblaciones de selección recurrente para responder a la demanda de los programas nacionales de mejoramiento.
- Continuar el mejoramiento de las poblaciones que maneja actualmente el proyecto.
- Continuar el desarrollo y la evaluación de las líneas obtenidas de esas fuentes.
- Compartir las líneas avanzadas con los programas de mejoramiento de arroz de secano de varios países de la región latinoamericana.

Referencias bibliográficas

- Altman, D.W.; Busch, R.H. 1984. Random intermating before selection in spring wheat. *Crop Science* 24:1085-1089.
- Bajaj, R.K.; Bains, K.S.; Chahal, G.S.; Khbhra, A.S. 1990. Effect of intermating and selection in barley. *Crop Improvement* 17:54-58.
- Châtel, M.; Guimarães, E.P. 1998. Catalogue registration to manage rice gene pools and populations improvement. Proyecto CIRAD/CIAT. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement-Department des cultures annuelles (CIRAD-CA) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 62 p.
- Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Catalogue registration to manage rice gene pools and population improvement. Proyecto CIRAD/CIAT. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement-Department des cultures annuelles (CIRAD-CA) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 75 p.
- Châtel, M.; Guimarães, E.P.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1997a. Utilización de acervos genéticos y poblaciones de arroz de secano que segregan para un gen de androesterilidad. In: Guimarães, E.P. (ed.). Selección recurrente en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 125-138.

- Châtel, M.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1997b. Recurrent selection breeding, using gene pools and populations with recessive male-sterile gene and conventional breeding. Informe anual del proyecto colaborativo entre el CIRAD, el CIAT y el FLAR. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 65 p.
- Châtel, M.; Ospina, Y.; Rodríguez, F.; Lozano, V.H. 2001. Composite population breeding for upland savannas and lowland rice ecosystems. In: CIRAD/CIAT Annual Report 2001. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 50 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2003. Memorias del Seminario-Taller Internacional de Mejoramiento de Arroz de Secano para América Latina y el Caribe. Cali, Colombia. Disponible en: <http://webapp.ciat.cgiar.org/riceweb/memorias/tallersecano.html>
- Cuevas-Pérez, F.E.; Guimarães, E.P.; Berrío, L.E.; González, D.I. 1992. Genetic base of irrigated rice in Latin America and the Caribbean, 1971 to 1989. *Crop Science* 32:1054-1059.
- Federer, W.T. 1956. Augmented (or hoonuiaku) designs. *Hawaiian Planter's Record* 55:191-208.
- Guimarães, E.P. 1985. Genetic improvement of soybean from populations developed by alternative strategies of recurrent selection. Tesis (Ph.D.). Iowa State University (ISU), Ames, Iowa, EE.UU. 116 p.
- Guimarães, E.P.; Châtel, M.; Ospina, Y.; Borrero, J. 1995. Mejoramiento de arroz para suelos ácidos. In: Informe anual del CIAT 1993A-1994B. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 184 p.
- INGER (Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz). 1991. Cruzamientos de arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. v.1, 426 p.
- Jenkins, M.T. 1940. The segregation of genes affecting yield of grain in maize. *Journal of the American Society of Agronomy* 32:55-63.
- Leal, D.M.; Sarkarung, S.; Sanz, J.I.S.; Aguirre, R.H.V.; Delgado, H.H. 1991. Oryzica Sabana 6, variedad mejorada de arroz para sistemas sostenibles de producción en suelos de sabana. Plegable de divulgación no. 238. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Bogotá, Colombia. 6 p.
- Meredith, W.R. Jr.; Bridge, R.R. 1971. Breakup of linkage blocks in cotton, *Gossypium hirsutum* L. *Crop Science* 11:695-698.
- Miller, P.A.; Rawlings, J.O. 1967. Breakup of initial linkage blocks through intermating in a cotton breeding program. *Crop Science* 7:199-204.
- Montalván, R.; Destro, D.; Silva, E.F. da; Montaña, J.C. 1998. Genetic base of Brazilian upland rice cultivars. *Journal of Genetic Breeding* 52:203-209.

- Ospina, Y.; Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Mejoramiento poblacional del arroz de sabanas. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 241-254.
- Piper, T.E.; Fehr, W.R. 1987. Yield improvement in a soybean population by utilizing alternative strategies of recurrent selection. *Crop Science* 27:172-178.
- Polanco, R.P.; Châtel, M.; Guimarães, E.P. 2000. Mejoramiento poblacional del arroz en Cuba: Situación actual y perspectivas. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 131-144.
- Rangel, P.H.N.; Guimarães, E.P.; Neves, P. de C.F. 1996. Base genética das cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 31(5): 349-357.
- Singh, R.J.; Ikehashi, H.I. 1981. Monogenic male-sterility in rice: Introduction, identification and inheritance. *Crop Science* 21:286-289.
- Taboada, R.; Guzmán, R.; Viruez, J.; Callaú, V.H.; Châtel, M.; Ospina, Y.; Rodríguez, F.; Lozano, V.H. 2003. Improved rice germplasm for Latin America and the Caribbean. CIAT-Santa Cruz (Bolivia) y Proyecto CIRAD/CIAT. In: Annual Report 2003. Documento del CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 45 p.
- Taillebois, J.; Guimarães, E.P. 1989. CNA-IRAT 5 upland rice population. *International Rice Research Newsletter* 14(3):8.
- Tao, D.; Hu, F.; Yang, Y.; Xu, P.; Li, J. 2000. Yunnan, China: Mejoramiento poblacional de arroz para rendimiento de granos, resistencia a piricularia, tolerancia del frío y calidad del grano. In: Guimarães, E.P. (ed.). Avances en el mejoramiento poblacional en arroz. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p. 145-154.