

Respuesta agronómica de líneas de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) a la fertilidad de un Oxisol

por

Ronald Dorcinvil

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

En

Agronomía

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2009

Aprobado por:

David Sotomayor Ramírez, PhD
Presidente, Comité Graduado

Fecha

James S Beaver, PhD
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Carlos A. Flores Ortega, MSc
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Miguel Muñoz, PhD
Director Departamento

Fecha

Lucas N. Avilés Rodríguez, MSc
Representante Estudios Graduados

Fecha

Abstract

With the objective to identify genotypes of dry bean efficient in the acquisition of nitrogen (N) and phosphorus (P) and to evaluate the role of the root architecture in the adaptation of these genotypes under low availability of N and P, 4 experiments were planted in a Oxisol (very-fine, kaolinitic, isohyperthermic Typic Eutrustox) in Isabela, Puerto Rico. In the first experiment, 228 genotypes originating of the Improvement Program of the 'Escuela Agrícola Panamericana de Honduras' and the University of Puerto Rico were evaluated. In the second experiment, 34 genotypes selected in the first one and 2 controls (Morales y Salagnac 90) were evaluated under 3 treatments of fertilization: (i) 50 kg N ha⁻¹, 57 kg P₂O₅ ha⁻¹, 54 kg K₂O ha⁻¹, (ii) the same dose of P₂O₅ y K₂O without N, (iii) the same dose of N y K₂O without P. In the third experiment, the root architecture of the 3 better genotypes in the second experiment and the 2 controls was evaluated under the 3 treatments of fertilization previously described. In the fourth experiment, 6 black sister lines of dry bean (3 with shallow root system, 3 with deep root system) and 9 combinations of the same were evaluated under 2 treatments of fertilization (without fertilizer and application of 50 kg ha⁻¹ N, P₂O₅, K₂O, respectively). VAX 3 was identified efficient in the acquisition of N and P but non respondent to the application of N and P fertilizer. PR 0443-151 was identified efficient in the acquisition of N and P and it responds as well to the application of N and P fertilizer. VAX 3 had a shallow root system under low availability of N and P whereas PR 0443-151 had an intermediate root system under low N and a shallow root system under low P. Under low fertility, the sister lines with shallow and mixed root system had a greater yield (1254 kg ha⁻¹ and 1302 kg ha⁻¹, respectively) than the sisters lines with deep root system (1040 kg ha⁻¹). Under high fertility the opposite occurred. Under low fertility the concentration of N and P in the leaves of sisters lines with shallow root system (4.1%N and 0.4%P) were greater than the sister lines with deep root system (3.4%N and 0.3%P).

Resumen

Se realizaron cuatro experimentos con los objetivos de identificar líneas de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) eficientes en la adquisición de nitrógeno (N) y de fósforo (P) y evaluar el rol de la arquitectura del sistema radicular sobre la adaptación de estas líneas bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P. En el primer experimento se evaluaron 228 líneas provenientes de los programas de mejoramiento de la Escuela Agrícola Panamericana de Honduras y de la Universidad de Puerto Rico. En el segundo experimento, 34 líneas de habichuela seleccionadas del primer experimento y dos testigos (Morales y Salagnac 90) fueron evaluadas bajo tres tratamientos de fertilización: (i) 50 kg N ha⁻¹, 57 kg P₂O₅ ha⁻¹, 54 kg K₂O ha⁻¹ (completo), (ii) las mismas dosis de P₂O₅ y de K₂O sin el N (-N), (iii) las mismas dosis de N y de K₂O sin el P (-P). En el tercer experimento se evaluó la arquitectura del sistema radicular de las tres mejores líneas del segundo experimento y de los dos testigos (Morales y Salagnac 90) bajo los tres tratamientos de fertilización descritos previamente. En el cuarto experimento, seis líneas hermanas de habichuela (tres con sistema radicular superficial, tres con sistema radicular profundo) y nueve combinaciones de mezclas de semillas de las mismas fueron evaluadas bajo dos tratamientos de fertilización (sin fertilizante y aplicación de 50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, respectivamente). La línea VAX 3 fue identificada como eficiente en la adquisición de N y de P pero no respondedora a la aplicación de las mismas. La línea PR0443-151 fue identificada como eficiente en la adquisición de N y de P y a su vez responde a la aplicación de N y de P. La línea VAX 3 tuvo un sistema radicular superficial tanto bajo condiciones de baja disponibilidad de N como de P mientras que la línea PR 0443-151 tuvo un sistema radicular intermedio bajo condiciones de baja disponibilidad de N y un sistema superficial bajo condiciones de baja disponibilidad de P. Bajo condiciones de baja fertilidad, las líneas con sistema radicular superficial y mixto tuvieron un mayor rendimiento (1254 kg ha⁻¹ y 1302 kg ha⁻¹, respectivamente) que las líneas con sistema radicular profundo (1040 kg ha⁻¹), mientras que bajo condiciones de alta fertilidad ocurrió lo contrario. Bajo condiciones de baja fertilidad las concentraciones de N y de P en el tejido de las líneas con sistema radicular superficial (4.1%N y 0.4%P) fueron mayores que en las líneas con sistema radicular profundo (3.4%N y 0.3%P).

Copyright. © 2009. Ronald Dorcinvil
All rights reserved

Agradecimientos

- ▼ A Dios el todopoderoso, por darme la vida y conservarme la salud durante estos años de estudio en Puerto Rico.
- ▼ Al Dr David Sotomayor-Ramírez por haber aceptado ser presidente de mi comité graduado y brindarme la oportunidad de terminar mis estudios graduados.
- ▼ Al Dr. James S. Beaver por haberme dado la oportunidad de realizar estudios superiores sin olvidar sus orientaciones a lo largo de esta investigación y los materiales que han puesto disponible para la realización de este trabajo.
- ▼ Al MSc. Carlos Flores por haber aceptado ser parte de mi comité graduado y dedicar su tiempo en la revisión de este trabajo.
- ▼ Al proyecto Bean/Cowpea Collaborative Research Support Program (Bean/Cowpea CRSP) por el financiamiento de esta investigación.
- ▼ Al Ministerio de Agricultura de Haití (MARNDR) y en especial a los Agr Emmanuel Prophète y Lyonel Valbrun por dirigirme a lograr estos sueños de estudio y a la DDANO por haber hecho estos sueños realidades.
- ▼ Al Dr Luis Pérez Alegría por haberme permitido usar sus equipos (escáner y software) en la caracterización del sistema radicular.
- ▼ Al Dr Feiko Ferwerda por haberme permitido usar las facilidades de su laboratorio durante todo el tiempo de esta investigación.
- ▼ Al Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA-NCRS) por haberme ayudado en la colecta de raíces con Giddings pro.
- ▼ A todos mis profesores del RUM por contribuir a mi formación y al enriquecimiento de mis conocimientos.
- ▼ A mis compañeros: Sonia Carlo, Gasner Demosthene, Axel Ramírez, Gerson Ardila, Jacqueline Vega y Vivianette Vera por su gran ayuda en los trabajos de campo. Sin su ayuda la tarea hubiese sido muy difícil.
- ▼ A todos los empleados de la Estación Experimental Agrícola de Isabela.
- ▼ Al personal del departamento de Agronomía y suelos en especial Gloria, Evelyn, Floripe y Pino por toda la paciencia que tuvieron conmigo.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a:

- ▼ Mis padres Vilandieu Dorcinvil y Marie-Ange Jean Philippe por todo su amor y tanto sacrificio que han consentido para que yo pueda lograr mis metas en la vida.
- ▼ A mis tíos Benedict, Georges y Marie-Paule por estar siempre dispuestos a brindarme su colaboración cuando es necesaria.
- ▼ A Carmen Vixamar por todo su amor y sus consejos.
- ▼ A mis compañeros de Haití Gasner Demosthene y Raphael Colbert por todo su amistad.
- ▼ A mis amigos de Puerto Rico, Republica Dominicana y Colombia: Sonia, Axel, Ixia, Soltaína, Vivianette, Feliciano, Glennys, Beatriz, Gerson, Alexander por haber sido otra familia para mí durante estos años en Puerto Rico.
- ▼ A mis compañeros de internado en Dakota del Norte: Hector, Adiana, Dainette, Verónica y Pamela por todo su apoyo en la redacción del documento final.
- ▼ A todos y todas que de una manera u otra ha hecho realidad esta investigación.

Tabla de contenido

Abstract	ii
Resumen	iii
Agradecimientos	v
Dedicatoria	vi
Tabla de contenido	vii
Lista de cuadros	x
Lista de figuras	xiv
Lista de apéndices.....	xvii
1. Introducción	1
2. Objetivos e hipótesis	3
2.1 Objetivos generales	3
2.2 Objetivos específicos	3
2.3 Hipótesis	3
3. Revisión de literatura	4
4. Materiales y métodos	16
4.1 Localización	16
4.2 Experimento 1: Selección de mejores líneas.	17
4.2.1 Siembra y prácticas culturales.....	17
4.2.2 Tratamientos.	17
4.2.3 Diseño experimental.....	21
4.2.4 Características evaluadas	21
4.2.5 Análisis estadísticos	21
4.3 Experimento 2: Selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P.	22
4.3.1 Ensayo 1: Junio 2007	22
4.3.1.1 Siembra y prácticas culturales	22
4.3.1.2 Tratamientos.....	22
4.3.1.3 Diseño experimental	23
4.3.1.4 Características evaluadas.....	24
4.3.1.5 Análisis estadísticos.....	26

4.3.2 Ensayo 2: Enero 2008	26
4.4 Experimento 3: Caracterización de la arquitectura del sistema radicular..	27
4.4.1- Siembra, prácticas culturales y tratamientos.....	27
4.4.2- Características evaluadas	27
4.4.3 Análisis estadísticos	29
4.5 Experimento 4: Adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido a estrés de nutrientes.	29
4.5.1 Ensayo 1: febrero 2007	29
4.5.1.1 Siembra, prácticas culturales y tratamientos	29
4.5.1.2 Diseño experimental.	30
4.5.1.3 Características evaluadas.....	31
4.5.1.4 Análisis estadísticos.....	31
4.5.2 Ensayo 2: enero 2008.	32
5. Resultados y discusión	32
5.1. Experimento 1: Selección de mejores líneas	32
5.1.1 Rendimiento en grano y susceptibilidad a roya.	32
5.2. Experimento 2: Selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P.	35
5.2.1 Rendimiento en grano y eficiencia agronómica.	35
5.2.1.1 Ensayo 1: junio 2007	35
5.2.1.2 Ensayo 2: enero 2008.....	48
5.2.2 Adaptabilidad.....	60
5.2.3. Peso específico de 100 semillas (junio 2007).....	63
5.2.4 Relaciones entre rendimiento en grano y sus componentes	66
5.2.4.1 Junio 2007	66
5.2.4.2 Enero 2008	70
5.2.5 Contenido de nutrientes en el suelo	73
5.2.5.1 junio 2007	73
5.2.5.2 enero 2008.....	75
5.3. Experimento 3: Caracterización de la arquitectura del sistema radicular.	76

5.3.1 Vainas por planta	77
5.3.2 Biomasa aérea	79
5.3.3 Peso seco raíz y razón peso seco raíz: vástago	81
5.3.4 Longitud del sistema radicular.....	84
5.3.4.1 Por profundidad	84
5.3.4.1 Por tipo de raíz.....	89
5.4 Experimento 4: adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido.....	95
5.4.1 Rendimiento en grano y eficiencia agronómica	95
5.4.1.1 Por líneas.....	95
5.4.1.2 Por sistema radicular	106
5.4.2 Concentración de nutrientes en las hojas.....	108
5.4.3 Relaciones entre rendimiento y concentración de nutrientes en las hojas.....	109
6. Conclusiones y recomendaciones.....	111
7. Literatura citada.....	114
APENDICES.....	124

Lista de cuadros

Cuadro 1: Líneas de VIDAC Rojo evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.	18
Cuadro 2: Líneas de VIDAC Negro evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.	19
Cuadro 3: Líneas de la Escuela Agrícola Panamericana evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.	20
Cuadro 4: Líneas L88 seleccionadas para el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular diferentes a estrés de nutrientes, Isabela, febrero 2007.	30
Cuadro 5: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.	32
Cuadro 6: Líneas VIDAC rojo seleccionadas en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.	33
Cuadro 7: Líneas VIDAC negro seleccionadas en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.	33
Cuadro 8: Líneas de la escuela Panamericana seleccionadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.	34
Cuadro 9: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, Junio 07.	35
Cuadro 10: Rendimiento en grano por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de selección de líneas de habichuela bajo estrés de N y de P, Isabela, junio 2007.	35
Cuadro 11: Eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU) de N y rendimiento relativo (RR) de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, junio 2007.	41
Cuadro 12: Eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU) y rendimiento relativa (RR) de las líneas en el tratamiento de	

fertilidad menos P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, junio 2007.	43
Cuadro 13: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 08.....	48
Cuadro 14: Rendimiento en grano por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.....	48
Cuadro 15: Eficiencia agronómica, rendimiento relativo y eficiencia de uso de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.....	52
Cuadro 16: Eficiencia agronómica, rendimiento relativo y eficiencia de uso de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.....	55
Cuadro 17: Adaptabilidad de las líneas en los dos ensayos del experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007 y enero 2008.....	62
Cuadro 18: Análisis de varianza para el peso específico de semilla en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 07.	63
Cuadro 19: Peso específico de semilla de las líneas del experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.	64
Cuadro 20: Peso específico de semillas por color de las líneas del experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.....	65
Cuadro 21: Principales características químicas del suelo antes de la siembra y de la aplicación de los fertilizantes en el experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.....	73
Cuadro 22: Principales características químicas del suelo antes de la siembra y de la aplicación de los fertilizantes en el experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.	76

Cuadro 23: Comportamiento en termino de eficiencia y respuesta de las líneas evaluadas en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	77
Cuadro 24: Numero de vainas/planta de 5 líneas en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.....	78
Cuadro 25: Biomasa aérea por línea al final de la etapa vegetativa (4 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.....	79
Cuadro 26: Biomasa por línea y por régimen de fertilización al final de la floración (8 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	80
Cuadro 27: Peso seco de raíz por línea y por tratamiento de fertilización al final de la floración (8 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	82
Cuadro 28: Coeficientes de correlación (Pearson) entre peso seco de raíz y rendimiento en grano en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.....	82
Cuadro 29: Longitud por línea y fertilidad a tres profundidades en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	85
Cuadro 30: Coeficientes de correlación (Pearson) entre rendimiento en grano y porcentaje de longitud radicular en los tratamientos de fertilidad completo y menos P en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.....	85
Cuadro 31: Longitud por tipo de raíz, línea y fertilidad en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.....	91
Cuadro 32: Análisis combinada de varianza para rendimiento en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, Puerto Rico, febrero 07 y enero 08.....	95

Cuadro 33: Rendimiento de las líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.....	97
Cuadro 34: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.....	99
Cuadro 35: Eficiencia agronómica según el método de la diferencia para las líneas puras en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.....	99
Cuadro 36: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, enero 2008.....	102
Cuadro 37: Rendimiento por tipo de raíz y por régimen de fertilización en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, Febrero 2007 y Enero 2008.....	107
Cuadro 38: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por sistema radicular en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela.....	107
Cuadro 39: Análisis de varianza para concentración de nutrientes en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.....	108
Cuadro 40: Concentración de nutrientes por sistema radicular y por fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.....	108
Cuadro 41: Relaciones lineales entre rendimiento y concentraciones de nutrientes en las hojas bajo condiciones de alta fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.....	110

Lista de figuras

Figura 1: Localización del terreno donde se localizó los ensayos de fertilidad en habichuela, Isabela, 2007 y 2008.	16
Figura 2: Características de cada línea en cuanto a eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento bajo estrés de N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.....	46
Figura 3: Características de cada línea en cuanto a eficiencia, respuesta y rendimiento bajo estrés de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.	47
Figura 4: Características de cada línea en cuanto a eficiencia de uso, respuesta agronómica y rendimiento bajo estrés de N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.	58
Figura 5: Características de cada línea en cuanto a eficiencia, respuesta y rendimiento bajo estrés de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.....	59
Figura 6: Relación lineal entre rendimiento en grano y peso específico de semillas para las líneas de grano rojo y de grano negro en el experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.	66
Figura 7: Relación entre eficiencia agronómica bajo estrés de N y de P y rendimiento potencial (tratamiento de fertilidad completo) y en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.....	68
Figura 8: Relación entre eficiencia agronómica y productividad relativa bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.	68
Figura 9: Relación entre rendimiento en grano y eficiencia de uso (EU) bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.	69
Figura 10: Relación entre rendimiento en grano (tratamiento de fertilidad completo) y eficiencia agronómica bajo estrés de N y de P en el	

experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.	71
Figura 11: Relación entre eficiencia agronómica y productividad relativa bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.	71
Figura 11: Relación entre rendimiento en grano y eficiencia de uso (EU) bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela. Isabela, enero 2008.....	72
Figura 13: Relación entre el rendimiento relativo y el pH en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.....	74
Figura 14: Relación entre el rendimiento en grano y el NO_3^- extraíble y el P extraíble en el suelo en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.....	75
Figura 15: Relación entre el rendimiento en grano y el numero de vainas por planta en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	78
Figura 16: Relación entre el rendimiento en grano y el peso seco de vástago al final de la floración en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	81
Figura 17: Razón peso seco raíz: vástago por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	83
Figura 18. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos N, enero 2008.....	87
Figura 19. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos P, enero 2008.	89
Figura 20. Relación entre rendimiento en grano y longitud de raíces laterales en los tratamientos de fertilidad menos P y completo en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.	92

Figura 21. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos N, enero 2008.....	94
Figura 22. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos P, enero 2008.....	94
Figura 23: Características de cada línea en cuanto a eficiencia y rendimiento bajo condiciones de baja fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.	100
Figura 24: Características de cada línea en cuanto a eficiencia y rendimiento bajo condiciones de baja fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, enero 2008.	103
Figura 25: Relación entre rendimiento en grano (tratamiento de fertilidad completo) y eficiencia agronómica en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.	104
Figura 26: Relación entre rendimiento relativo y eficiencia agronómica en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.....	105

Lista de apéndices.

Apéndice 1: Rendimiento de las líneas VIDAC rojo evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.....	125
Apéndice 2: Rendimiento de las líneas VIDAC negro evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.....	128
Apéndice 3: Rendimiento de las líneas de la Escuela Panamericana evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.....	130

1. Introducción

La habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa de grano más importante para el consumo humano en el mundo. Juega un papel importante en la dieta de los Latinoamericanos incluyendo los Caribeños, proveyendo cerca del 25% de consumo diario de proteínas y es una fuente primaria y barata de carbohidratos y de minerales para las poblaciones rurales (Broughton et. al., 2003; Kimani et al, 2007).

La producción anual de habichuela en el mundo para el 2005, a nivel de finca sobrepasó los 18×10^6 de toneladas métricas (Tm) por un valor de mas de \$US 1.1×10^9 (FAO, 2005). En el 2005, América Latina y el Caribe (ALC) era la región más importante en el mundo de producción de habichuela con un área de siembra de 6.41×10^6 hectáreas con una producción anual de 5.5×10^6 Tm representando más del 25% de la producción mundial (FAO, 2005). El 9% y el 3.3% de la producción mundial se encuentra en Centro América y el Caribe, respectivamente. Del Caribe, Haití es el país con mayor extensión de terreno en producción de habichuela con 85,760 ha. En ALC, la habichuela se cultiva desde el nivel del mar hasta 3000 m de altura por pequeños productores que disponen en la mayoría de las veces de menos de 1 ha (Broughton et al., 2003). El 80% de la producción de habichuela en ALC y el África Subsahariana se siembra en zonas montañosas de baja fertilidad de suelos y propensas a la erosión (Pachico, 1999). Como consecuencia, el rendimiento (grano seco) promedio es menor de 1000 kg ha^{-1} . En el caso de Haití, el rendimiento promedio es de 623 kg ha^{-1} (http://www.ciat.cgiar.org/beans/worldstat2_latin_america.htm).

En ALC, la baja disponibilidad de nitrógeno (N) y de fósforo (P) en suelos es el factor mas limitante en la producción de habichuela, seguida por factores de acidez del suelo como el exceso de aluminio (Al) y de manganeso (Mn) (Lynch et. al., 2003). Se estima que 55% de la producción de habichuela en América Latina y 62% en América Central se ve afectada por la limitación de P, mientras que 52% de la producción en América Latina y 44% en América Central es afectada por el exceso de Al y Mn (Lynch et al., 2003).

El problema de baja fertilidad del suelo puede resolverse en parte y a corto plazo por el uso de fertilizantes químicos, pero la fertilización intensiva no siempre es una solución viable. Los productores de pequeña escala no disponen de suficientes recursos para conseguir los fertilizantes químicos y corregir estas deficiencias y algunos suelos del orden de los Oxisols, Ultisols y Andisols pueden fijar gran parte del fósforo aplicado a formas no disponible para la habichuela (Sánchez, 1976; Hinsinger, 2001). También, la aplicación intensiva de fertilizantes nitrogenados reducidos (en forma de NH_4^+) puede promover la acidificación de los suelos y la contaminación de las aguas subterráneas (Lynch et al., 2003). Por lo tanto, el desarrollo de líneas de habichuela que se adapten a condiciones de baja fertilidad con buena producción es una alternativa económica y ecológicamente viable, pues se adaptan mejor a sistemas agrícolas de menores insumos y además permite reducir los costos de producción al disminuir la dependencia de fertilizantes químicos (Singh et al., 2003).

Un elemento a tomar en cuenta en el desarrollo de genotipos de habichuela eficientes en la adquisición de nutrientes bajo condiciones de baja fertilidad es la arquitectura de la raíz, que se refiere a la configuración espacial del sistema radicular (Lynch, 2005; Lynch, 2007). La arquitectura de la raíz determina la proporción de tejido que una planta coloca en las diferentes clases de raíces (principal, laterales y adventicias) y su capacidad para explorar mayor volumen de suelo en la adquisición de nutrientes.

2. Objetivos e hipótesis

2.1 Objetivos generales

Los objetivos generales de este estudio son:

- Evaluar la respuesta agronómica de treinta y seis líneas de habichuela de origen Mesoamericana y determinar la arquitectura del sistema radicular de cinco de ellas bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P.
- Evaluar la respuesta agronómica de quince líneas de habichuela de grano negro y de sistema radicular conocido bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Identificar líneas de habichuela de origen Mesoamericana eficientes en la adquisición de N y de P bajo condiciones de baja disponibilidad de estos nutrientes en un Oxisol.
- Evaluar el rol de la estructura (arquitectura) de la raíz sobre la adaptación de las líneas a las condiciones de baja fertilidad de suelos.
- Estudiar las relaciones entre la fertilidad de suelos (reacción del suelo, P y N) y los rendimientos de las líneas evaluadas.

2.3 Hipótesis

- Bajo condiciones de baja disponibilidad de P se espera que una línea eficiente en la adquisición de P tendrá un sistema radicular superficial.
- Bajo condiciones de baja disponibilidad de N se espera que una línea eficiente en la adquisición de N tendrá un sistema radicular intermedio y/o profundo.
- Bajo condiciones de estrés de nutrientes se espera que una línea con sistema radicular superficial tendrá mayor rendimiento que una con sistema radicular profundo.
- Bajo condiciones de suficiencia de nutrientes, se espera que una línea con sistema radicular profundo tendrá mayor rendimiento que una con sistema radicular superficial.

3. Revisión de literatura

La fertilidad del suelo es el resultado de las interacciones entre las propiedades biológicas, físicas y químicas de un suelo. La fertilidad de un suelo esta relacionada con su capacidad para mantener una producción sostenible de cultivos (Amberger, 2006). Los principales factores determinantes de la fertilidad del suelo son: la materia orgánica (incluyendo la biomasa microbiana), la textura, la estructura, la profundidad, el contenido de los nutrientes, la disponibilidad de nutrientes por reacciones de intercambio, precipitación/solubilización y adsorción/desorción, la reacción del suelo (pH) y la ausencia de los elementos tóxicos (Al y Mn).

Por lo general, la habichuela se adapta a un rango amplio de suelos pero se obtienen mayores rendimientos en suelos bien drenados y que no contienen elementos que interfieren con la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas (NDSU, 1997). Se ha reportado que el pH optimo para su crecimiento varia entre 5.5 y 6.5 (Beaver, 2006). El crecimiento y rendimiento se reduce en suelos ácidos con alto contenido de Mn y Al soluble y tampoco tolera suelos muy alcalinos ni salinos (Abruña-Rodríguez et al., 1982; Bolanos y Segura, 1991). Cuando la habichuela crece en suelos salinos, la misma se torna clorótica y se reduce la producción de biomasa vegetativa y el rendimiento (NDSU, 1997). Se ha reportado un nivel umbral de salinidad de 1 dS/m; con 1.5 dS/m el rendimiento se reduce en un 10%, con 3.6 dS/m un 50% y no se produce nada con un nivel de salinidad de 6.5 dS/m (FAO, 2008). La habichuela no tolera lluvias excesivas y altas temperaturas; lluvias excesivas provocan caída de flores y vainas y se observa un incremento en la incidencia de enfermedades como pudrición de raíces. Altas temperaturas incrementan el contenido de fibra en la vaina (FAO, 2008). La cantidad de agua necesaria para una máxima producción de habichuela durante el ciclo varia entre 300 – 500 mm y la temperatura máxima tolerable es de 27°C (FAO, 2008)

En suelos ácidos, la toxicidad de Al es el principal problema que limita la producción de habichuela ya que el Al soluble reduce el crecimiento de la raíz y esta asociada con una baja disponibilidad de P, Ca, Mg y K (Lynch, 2007).

Abruña-Rodríguez et al. (1982), estudiaron el efecto de los factores de acidez del suelo sobre el rendimiento de habichuela seca en dos Ultisols y un Oxisol de Puerto Rico y encontraron que en los Ultisols el rendimiento máximo (1899 kg ha⁻¹) se obtuvo a un pH de 5.7 a cuyo nivel no había Al intercambiable en el suelo. El 95, 90, 75 y 50% de este rendimiento máximo se obtuvieron a pH de 5.3, 5.2, 4.9 y 4.5 respectivamente. A estos valores de pH, los niveles de saturación de Al en el suelo fueron de 10.6, 13.4, 22.5 y 36.8 % respectivamente. No se obtuvo ningún rendimiento a un pH de 4.0 correspondiente a un 61.3% de saturación de Al en el suelo. En el Oxisol la habichuela era más tolerante a aumentos de acidez, el rendimiento máximo (1455 kg ha⁻¹) se obtuvo a un pH de 5.6. A valores de pH de 4.9, 4.6, 4.1 y 3.5 se obtuvieron 95, 90, 75 y 50% del rendimiento máximo con niveles de saturación de Al de 18.7%, 28.7%, 45.3% y 65.3% respectivamente.

Fageria et al. (1991) evaluaron la producción de habichuela en un Oxisol de Brasil con un pH inicial de 5.0 y un contenido de Al intercambiable de 0.63 cmol_c kg⁻¹, y encontraron que con la aplicación de 12 TM/ha de cal agrícola, el pH subió de 5.0 a 6.0 y el contenido de Al intercambiable disminuyó de 0.63 a 0.04 cmol_c kg⁻¹. Los autores encontraron también que el rendimiento aumentó de 1153 kg/ha (71% del rendimiento máximo) en la parcela control (sin aplicación de cal) a 1638 kg/ha en la parcela encalada. Los resultados encontrados por Fageria et al. y Abruña-Rodríguez et al. demostraron que la habichuela respondió menos a aumentos de acidez del suelo en un Oxisol que en un Ultisol.

En Haití, la habichuela se siembra mayormente en dos tipos de suelos: los Vertisoles y los Oxisoles (GRET, 1991). Los Vertisoles “sols noirs” se encuentran en las depresiones en el paisaje de la zona sur de Haití. Son suelos arcillosos pudiendo tener hasta 80% de arcilla, poseen alto contenido de materia orgánica (4 a 6%) con pH ligeramente ácido y capacidad de intercambio catiónico (CIC) muy elevado (hasta 80 cmol_c kg⁻¹). La presencia de calcio activo en estos suelos reduce la disponibilidad de P (GRET, 1991). Los Oxisoles “sols rouges” se encuentran principalmente en la región norte de Haití. Estos suelos son muy ricos en óxidos e hidróxidos de Fe y Al que le confiere su color rojo, poseen una

alta porosidad (buen drenaje) y una baja capacidad de intercambio catiónico. El P se encuentra en forma no soluble y no disponible para las plantas a causa de la abundancia de los iones Fe^{2+} y Al. Debido también a una carencia de potasio, la fertilidad de estos suelos depende principalmente de su materia orgánica (GRET, 1991).

3.1 Fósforo (P)

El P fue identificado como un elemento esencial en la nutrición de las plantas en 1839 por Sprengel (Roy et al., 2006). Es uno de los nutrientes que mas limita la producción de la habichuela en Haití y muchos de los suelos del trópico (Hinsinger, 2001). Se estima que en el mundo hay 5.7×10^6 ha de suelo, 45% de la superficie arable, que contiene una concentración en la solución de P demasiado baja (0.1 a 10 μM), 200 veces menor que la cantidad de P en las células de las plantas, para sostener una producción optima de cultivos (Kochian, 2000; Hinsinger, 2001; Vance et al., 2003; Liu et al., 2007). El P representa entre 0.1 y 0.4 % del peso seco de la planta y juega un papel importante en la transferencia de energía en forma de adenosina trifosfato (ATP) requerida para la biosíntesis del almidón y para la absorción de iones de la solución del suelo (Marschnner, 1995; Hinsinger, 2001; Vance et al., 2003; Roy et al., 2006). El P forma parte de estructuras macromoleculares importantes como los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y se encuentra también en la doble capa fosfolipídica de la membrana celular (Hinsinger, 2001; Epstein y Bloom, 2005; Roy et al., 2006). En el ADN y el ARN, el P forma un puente entre las diversas unidades de ribonucleótidos y es responsable de la fuerte acidez de estas moléculas (Marschnner, 1995). El P es esencial para la fotosíntesis, es indispensable para la diferenciación de las células y para el desarrollo de los tejidos que forman los puntos de crecimiento de la planta. Para una fotosíntesis optima, se requiere en el cloroplasto una concentración de P inorgánico (P_i) entre 2.0 y 2.4 mM y la fotosíntesis se inhibe si la concentración de P_i baja entre 1.0 y 1.4 mM (Marschnner, 1995). Para suelos de Puerto Rico, niveles críticos

de P se han establecido por Muñiz Torres (1992). Valores de P extraíble por el método Bray I de 10 ppm se considera bajo, entre 10 a 20 ppm se considera mediano y valores superiores a 20 ppm se consideran altos (Sotomayor-Ramirez, 2006).

Los síntomas visuales de deficiencia de P en la habichuela, aparecen primeramente en las partes viejas de la planta. La carencia de P causa que se reduzca el área foliar, las hojas adquieren un color verde oscuro y a lo largo de las venas se puede observar una coloración púrpura (Hinsinger, 2001). La deficiencia de P incrementa la razón raíz:vástago. La habichuela no responde a la aplicación de N cuando el P es deficiente (Amberger, 2006). Además, el P es esencial para el desarrollo de los nódulos los cuales tienen una concentración de P de 100 g kg^{-1} (Hernández, 2006). Kimani et al. (2007) encontraron que genotipos de habichuela tolerantes a condiciones de bajo P produce más nódulos que genotipos susceptibles y que generalmente condiciones de bajo P inhibe la nodulación. La deficiencia de P en suelos se debe a dos factores principales:

- a) En los suelos ácidos (pH bajo), la solubilidad de los óxidos de Fe y Al precipitan al P en forma de fosfatos de Fe y de Al insolubles (Hinsinger, 2001; Amberger, 2006).
- b) En los suelos alcalinos los iones ortofosfatos reaccionan con el Ca libre en solución y se precipitan como fosfato de Ca, fosfato dicálcico, fosfato octacálcico insolubles (Hinsinger, 2001; Manahan, 2005)

La absorción de P, por la planta, se maximiza cuando otros aniones como el hidroxilo (OH^-), el bicarbonato (HCO_3^-), los silicatos solubles y aniones orgánicos asociados a la materia orgánica del suelo compiten con los iones fosfatos en la superficie de adsorción de los óxidos de Fe, Al y minerales arcillosos (Amberger, 2006). Eso se debe a que los iones silicatos son adsorbidos en la superficie de los óxidos de Fe y Al en vez de los iones fosfatos (Amberger, 2006).

Se ha demostrado que existen líneas de habichuela, que son más eficientes que otras en la absorción de P (Marschner, 1995). Durante el proceso de absorción de P estas líneas liberan protones en la rizósfera reduciendo el pH lo

suficiente como para aumentar la solubilidad de los fosfatos insolubles. Así, estas líneas son capaces de crecer en suelos con baja disponibilidad de P produciendo el doble de peso seco raíz:vástago que las plantas no adaptadas a condiciones de bajo P (Marschner, 1995). Beebe et al. (2006) probando el efecto de la limitación de P sobre dos genotipos de habichuela, DOR 364 (ineficiente bajo condiciones de baja disponibilidad de P) y G19833 (eficiente bajo condiciones de baja disponibilidad de P), demostraran que bajo condiciones de limitación de P (aplicación de 6 kg ha^{-1} de P) la razón peso seco raíz:vástago de G19833 (1.14) fue casi tres veces mayor que la obtenida por DOR 364 (0.4), mientras que bajo condiciones de alta disponibilidad de P (aplicación de 20 kg ha^{-1} de P) los dos proporciones fueron similares. Los autores encontraron también que bajo condiciones de baja disponibilidad de P hubo una mayor acumulación de P (1.64 mg g^{-1} de peso seco de planta) en el genotipo eficiente que en el ineficiente (0.83 mg g^{-1} de peso seco de planta).

El P es un elemento de poca movilidad en el suelo y tiene que estar en una forma de iones ortofosfatos, H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} para ser absorbido por las raíces, (Manahan, 2005; Roy et al., 2006). En los suelos agrícolas, la fertilización y otras prácticas agronómicas tienden a incrementar la disponibilidad del P en los horizontes superficiales del suelo con un movimiento muy lento hacia el subsuelo. La disponibilidad es mas alta en la capa superficial debido a la deposición continua del P proveniente de hojas caídas y otros residuos de plantas y condiciones mas favorables como alta actividad microbiana y pH mas neutral (Lynch y Brown, 2006). Por otro lado, Bonser et al. (1996) reportaron que en los Oxisoles e Ultisoles del trópico húmedo, el P se concentra en los horizontes superiores y el contenido de P orgánico tiende a disminuir con la profundidad.

Otro factor que influye mucho en la absorción de P por la habichuela es la arquitectura de la raíz. El sistema radicular de la habichuela se compone de una raíz principal, de raíces laterales que se originan de la parte basal del sistema radicular, de raíces adventicias desarrolladas a partir del tallo subterráneo (el hipócotilo) (Hall, 1991). La raíz principal de la habichuela puede alcanzar una

profundidad máxima entre 1 y 1.5 m mientras que las raíces laterales se concentran en los primeros 30 cm. Al momento de la germinación, la profundidad del sistema radicular es de 7 cm y al principio de la floración es de 30 – 40 cm (FAO, 2002). Las características de la arquitectura del sistema radicular asociadas con la adquisición de P en el suelo incluyen el crecimiento superficial de las raíces laterales, el aumento en la producción de raíces adventicias y una mayor dispersión de las raíces laterales (Lynch, 2007).

Lynch y Brown (2006) encontraron que las raíces laterales son las más importantes en la exploración superficial del suelo. Dependiendo de su ángulo de crecimiento que varía de horizontal (0°) a 75° del horizontal, estas pueden ser superficiales o profundas. Ge et al. (2000) usaron un modelo geométrico para evaluar el efecto del gravitropismo de las raíces secundarias en la adquisición de P. Este estudio demostró que en suelos con una distribución uniforme de P, genotipos eficientes en la adquisición de P que tienen el sistema radicular superficial exploran más suelo por unidad de biomasa radicular que genotipos deficientes en la adquisición de P que tienen un sistema radicular profundo porque en el sistema superficial. Las raíces están más dispersadas y por ende existe menos competencia entre ellas (Ge et al., 2000). La disminución del ángulo de crecimiento de las raíces laterales en los genotipos eficientes, se asocia con la reducción de la concentración de P en el vástago y por ende conduce a una acumulación de biomasa y un aumento de la superficie foliar (Bonser et al., 1996).

Otro tipo de raíz que juega un papel importante en la adquisición de P son las raíces adventicias que están localizadas cerca de la superficie del suelo donde el P es relativamente abundante (Ochoa et al., 2006) y su crecimiento horizontal hace que concentre su actividad de exploración en la parte superficial del suelo (Lynch, 2007). Miller et al. (2003) encontraron que condiciones de estrés de P estimulan la producción de raíces adventicias en genotipos de habichuela eficientes. Las raíces adventicias tienen mayor longitud por unidad de biomasa (longitud específica). La producción de raíces adventicias es una adaptación de los genotipos de habichuela a condiciones de baja disponibilidad de P, pues

exploran más eficientemente los horizontes superiores que los otros tipos de raíces (Miller et al., 2003), y con menor costo metabólico para los tejidos de la raíz (Lynch y Ho, 2005).

Los genotipos de habichuela varían sustancialmente en su adaptación a suelos con baja disponibilidad de P. Aparentemente eso se debe a los diferentes mecanismos de las raíces para adquirir el P del suelo. Los mecanismos que usan las raíces para adquirir P incluyen la movilización del P a través de la exudación de las raíces (fosfatasas, ácidos orgánicos y protones) y simbiosis con micorrizas y otros microorganismos del suelo (Lynch y Brown, 2006). Las raíces de los genotipos eficientes en la adquisición de P muestran alta plasticidad y desarrollan habilidades para responder a cambios en la disponibilidad de P en el suelo (Forde y Lorenzo, 2001).

Las características del sistema radicular que más influyen en la adquisición del P son la biomasa radicular, la longitud y la longitud específica de la raíz (longitud por biomasa radicular) y el diámetro de la raíz. Melissa et al. (2005) estudiaron el comportamiento de seis líneas de habichuela (tres con sistemas radiculares superficiales y otras tres con sistemas radiculares profundos) con dos niveles de P (alto con la aplicación de 70 kg ha^{-1} de P y bajo sin aplicación de P) y dos condiciones de humedad en el suelo (con y sin riego). Los autores encontraron que bajo condiciones de baja disponibilidad de P, las líneas con sistema radicular superficial produjeron mayor biomasa (raíz y vástago) que las con sistema radicular profundo, mientras que bajo condiciones de alta disponibilidad de P, las líneas con sistema radicular profunda produjeron mayor biomasa (raíz y vástago) que las con sistema radicular superficial. Las líneas con sistema radicular superficial presentaron mayores concentraciones de P que las líneas con sistema radicular profundo bajo estrés de P. Resultados similares fueron obtenidos por Kimani et al. (2007) al estudiar el comportamiento de genotipos de haichuela tolerantes y susceptibles a condiciones de bajo P en dos suelos, uno de bajo P (11 mg kg^{-1} disponible a 20 cm de profundidad según la prueba Mehlich 3) y el otro de alto P (25 mg kg^{-1} disponible a 20 cm de profundidad según la prueba Mehlich 3). Estos autores encontraron que bajo

condiciones de baja disponibilidad de P, los genotipos tolerantes tienen mayor longitud de raíz, mayor biomasa radicular y mayor rendimiento que los genotipos susceptibles. La longitud de raíces de los genotipos tolerantes incrementa hasta un 38% mayor que los genotipos susceptibles en el suelo de bajo P.

Beebe et al. (2006) evaluaron la adquisición de P de 86 líneas de habichuela provenientes del cruce 'DOR 364 x G19833', en un ensayo de campo sembrado en Colombia en un Andisol con un nivel de P extraíble de 2 mg kg^{-1} (determinado por Bray-II y que se considera muy baja para la producción de habichuela). Los tratamientos de este experimento consistieron en dos factores: las líneas de habichuela (los dos padres y sus 86 progenies) y dos niveles de P aplicados (20 kg ha^{-1} y 6 kg ha^{-1} de P). Ellos encontraron que el peso seco del vástago, el peso seco de la raíz y el peso seco total aumentaron 157%, 128% y 146%, respectivamente con la aplicación de 20 kg/ha de P. La aplicación de 20 kg ha^{-1} de P aumentó en 328% la concentración de P en las raíces. La longitud de las raíces resultó ser casi igual en los dos niveles de P. Del Valle et al. (1981) en un estudio realizado en Puerto Rico en un suelo tipo Orthoxic Palehumults con 6 mg kg^{-1} de P extraíble (Bray-II) reportaron también mayores rendimientos de la habichuela con la aplicación de 22 kg ha^{-1} de P.

Snapp et al. (1995) encontraron que bajo condiciones de estrés de P el diámetro de las raíces de habichuela disminuye, el crecimiento de las raíces es menos inhibido que el crecimiento del vástago, también se altera el patrón de crecimiento de las raíces colocando más biomasa en las raíces secundarias que en la raíz primaria. La habichuela tiene una mayor longitud específica (47 m g^{-1}) bajo condiciones de bajo P comparado con alto P (26 m g^{-1}), eso se debe a la producción de una mayor cantidad de raíces secundarias y adventicias.

Araujo et al. (2000) evaluaron el crecimiento y el rendimiento de 8 líneas de habichuela (BAT 76, 'Carioca', 'Goiano Precoce', 'ICA Pijao', 'Ouro Negro', Puebla 152, Rico 23, 'Rio Tibagi') sembradas en un ensayo de campo con dos niveles de aplicación de P (12 y 50 kg P ha^{-1}) en forma de superfosfato triple (SFT). Todas las líneas fueron inoculadas con las cepas BR10049 conteniendo *Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli* y BR100 50 con *Rhizobium tropici*.

Este experimento se realizó en un suelo arenoso Typic Haplustult con un pH de 4.9 y 5 mg kg⁻¹ de P extraíble (Bray-II). Los autores encontraron que el alto nivel de aplicación de P (50 kg ha⁻¹) estimuló el crecimiento vegetativo de las líneas incrementando significativamente el peso seco de la parte aérea de la planta, el peso seco de la raíz y el número de nódulos, lo que contribuyeron también en aumentos en rendimiento de semilla. La concentración de P en las hojas aumentó con el tiempo pero se incrementó de manera más intensa antes de la floración. La tasa de acumulación de P en las raíces fue influenciada por la fertilidad. En el nivel bajo de aplicación de P (12 kg/ha) la concentración de P aumentó entre las etapas V4 y R6, pero después se estabilizó. Bajo condiciones de alta fertilidad, el contenido de P en las raíces disminuyó después de la floración.

3.1.2 Nitrógeno (N)

El N es un elemento esencial para la vida y constituye el 78% del aire, es un gas incoloro e inodoro. El N se encuentra en las proteínas de toda célula viva (Vitousek et al., 1997) y fue identificado como elemento esencial en la nutrición de las plantas por De Saussure en 1804 (Roy et al., 2006). A pesar de su abundancia es uno de los elementos más limitantes para la producción, pues para ser absorbido por las raíces tiene que estar primordialmente en forma iónica, amonio (NH₄⁺) y/o nitrato (NO₃⁻) (Marschner, 1995). El N es un componente principal de muchos compuestos orgánicos, incluyendo los aminoácidos y los ácidos nucleicos (ADN y ARN) esenciales para la estructura y el metabolismo de las plantas, forma parte de las proteínas y de la clorofila (Lorente, 1997; Epstein y Bloom, 2005).

Dependiendo del estadio de desarrollo, el contenido de N requerido para un crecimiento óptimo de la habichuela varía entre 2 y 5% del peso seco de la planta. Cuando hay deficiencia de N en habichuela una clorosis generalizada es el síntoma más característico que se puede observar. Se retarda el crecimiento y las hojas viejas son las primeras en ser afectadas porque el N se mueve de los tejidos viejos hacia los tejidos nuevos (Marschner, 1995; Epstein y Bloom, 2005).

La fijación biológica mediante la inoculación, el uso de genotipos eficientes y la aplicación moderada de fertilizantes nitrogenados combinada con la inoculación son técnicas que permiten reducir la cantidad de fertilizantes nitrogenados usados en la agricultura (Baligar et al., 2001). La fijación biológica del N (FBN) es la simbiosis entre una leguminosa y una bacteria de la familia *Rhizobium* y en el caso de la habichuela se trata de *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* (Hungria et al., 2003; Schroder, 2006). La FBN es importante porque permite reducir el uso de fertilizantes químicos y los costos derivados (Hardarson y Danso, 1993; Vance, 2001). La FBN permite también reducir la contaminación de las aguas subterráneas por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados (Vance, 2001; Manahan, 2005; Sotomayor-Ramírez y Martínez, 2006B). La mejor manera de alcanzar una fijación biológica de N efectiva es mediante la inoculación que es un proceso de aplicación directa de la bacteria *Rhizobium* a las semillas de habichuela o al suelo (Schroder, 2006). La habichuela, siendo una de las leguminosas menos eficientes en la fijación, puede fijar un máximo de 40% del N requerido comparado con otras leguminosas como el gandul (80%) (Hardarson y Danso, 1993). Es de suma importancia combinar la inoculación con la aplicación moderada de fertilizantes nitrogenados.

Crespo et al. (1987) en un experimento realizado en la Estación Experimental de Juana Díaz, Puerto Rico en un suelo San Anton Clay Loam con 15 mg kg⁻¹ de N disponible con seis niveles de N (0, 22, 45, 90, 180 y 360 kg ha⁻¹) y dos niveles de inoculación (con y sin) encontraron que la inoculación combinada con la aplicación de 22 kg N ha⁻¹ incrementó significativamente la nodulación cuatro y ocho semanas después de la siembra y que la inhibición de la nodulación fue significativo a partir de la aplicación de 90 kg N ha⁻¹. Estos autores encontraron también que la inoculación aumentó significativamente los rendimientos con la aplicación de 45 kg ha⁻¹ (1827 kg ha⁻¹) comparado con las parcelas no inoculadas (1446 kg ha⁻¹).

Velazquez et al. (1988) condujeron un experimento en la Estación Experimental de Lajas, PR, en un suelo tipo Udic Chromusterts (serie

Fraternidad) con un pH de 6.4 y 3% de materia orgánica, con dos niveles de N (0 y 20 kg ha⁻¹) y tres niveles de inoculación (sin inoculación, inoculante en polvo, inoculante granular). Los autores encontraron que a los 63 días de la siembra, la mayor cantidad de nódulos fue obtenida con el inoculante en polvo combinado con la aplicación de 20 kg N ha⁻¹ y que los mayores rendimientos (1461 kg ha⁻¹ y 1493 kg ha⁻¹) fueron obtenidos con el inoculante en polvo a 0 y 20 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Vargas et al. (2000), en un experimento conducido en habichuela en un Oxisol de Brasil con cuatro niveles de N (0, 20, 40 y 60 kg ha⁻¹) y dos niveles de inoculación (con y sin), encontraron que a los 40 días después de la siembra, el mayor número de nódulos se obtuvo en las parcelas inoculadas con la aplicación de 20 kg ha⁻¹ mientras que el mayor rendimiento (3695 kg ha⁻¹) se obtuvo con la aplicación de 60 kg ha⁻¹. Los autores encontraron que la respuesta a la inoculación y a la fertilización nitrogenada es afectada por el cultivo previo (rotación). Cuando se cultiva habichuela por primera vez en un predio, la población de *Rhizobium* indígena es baja y rendimientos del orden de 3000 kg ha⁻¹ pueden ser obtenidos con solamente la inoculación de las semillas, mientras que con habichuela sembrada antes, la población de *Rhizobium* indígena es alta impidiendo la formación de nódulos por la inoculación y así es necesario la fertilización mineral para incrementar los rendimientos (Vargas et al., 2000).

La combinación de otros macronutrientes (P, K) y micronutrientes (S) con la aplicación moderada de N y la inoculación es otra manera para incrementar la fijación biológica del N y reducir el uso de fertilizantes nitrogenados. Tsai et al. (1993) realizaron un experimento en invernadero con un suelo Oxisol de Brasil con 3% de materia orgánica y 5.5 de pH. En este experimento los autores evaluaron cuatro niveles de N (5, 15, 60 y 120 mg kg⁻¹ de suelo) y tres niveles de macro y micro nutrientes (bajo: sin P, K, S; medio: 50 mg P kg⁻¹, 63 mg K kg⁻¹, 10 mg S kg⁻¹; alto: 200 mg P kg⁻¹, 256 mg K kg⁻¹, 40 mg S kg⁻¹), todas las parcelas fueron inoculadas. Los autores encontraron que a los 42 días de la siembra el mayor número de nódulos, en todos los niveles de N, se obtuvo con el nivel alto de macro y micro nutrientes. En el nivel bajo de macro y micro

nutrientes (no aplicación de P, K y S) la mayor biomasa aérea se obtuvo con la aplicación de 120 mg N kg⁻¹, mientras que en el nivel medio y alto de macro y micro nutrientes la mayor biomasa aérea se obtuvo con la aplicación de 5 y 15 mg N kg⁻¹, respectivamente.

Otra manera de reducir el uso de fertilizantes nitrogenados es mediante el uso de genotipos eficientes en la adquisición de N combinado con la inoculación. Henson (1993) en un experimento conducido en Brasil con 17 líneas de habichuela todas inoculadas con *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli* encontraron que a los 19 días de la siembra la línea Negro Argel eficiente en la adquisición de N tuvo mayor peso seco de nódulos comparado con las líneas ineficientes y a los 66 días de la siembra, Negro Argel y otra línea eficiente Puebla 152 tuvieron mayor biomasa aérea. Vadez et al. (1999) realizaron un experimento en invernadero en Colombia con 47 líneas de habichuela de las cuales 23 fueron ineficientes en la adquisición de N y 24 eficientes. Estos autores encontraron que las líneas eficientes produjeron mayor biomasa aérea y radicular que las líneas ineficientes.

Otro método para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados es mediante la selección de líneas que pueden adaptarse a condiciones de baja disponibilidad de N. Dos Santos y Fageria (2007) en un estudio realizado en Brasil en un suelo con 3% de materia orgánica con seis líneas de habichuela encontraron que sin la aplicación de N, la variedad 'Perola' tuvo 1890 kg ha⁻¹ mientras que las demás líneas tuvieron rendimientos menores a 1000 kg ha⁻¹. Lugo-López et al. (1977) en un estudio realizado en un suelo de la serie Coto en la Estación Experimental de Isabela, PR reportaron rendimiento de 1313 kg ha⁻¹ para la variedad de habichuela 'Bonita' sin la aplicación de N. Kimani y Tongoona (2008) realizaron un estudio en Kenya en dos localidades, una con alto disponibilidad de N (0.34%) y la otra con baja disponibilidad de N (0.19%) en donde evaluaron ocho líneas de habichuela, cinco susceptibles bajo condiciones de bajo N y tres tolerantes a bajo N. Los autores encontraron que las líneas tolerantes (CIM 9314-36, AFR 708 y CAL 143) tuvieron bajo condiciones de bajo N mayor longitud de raíces laterales, peso radicular, número de nódulos y rendimiento

que las líneas susceptibles (E5, E8, GLP-2, SCAM80, CAL 96). Las líneas tolerantes tuvieron un promedio de rendimiento de 1753 kg ha^{-1} en condiciones de bajo N.

4. Materiales y métodos

4.1 Localización

Los experimentos se establecieron en la Subestación de Isabela de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico (Figura 1) que se encuentra en la región noroeste de Puerto Rico a una longitud de 67.3° oeste, una latitud de 18.3° norte y a una elevación de 128 m sobre el nivel del mar. La temperatura media anual de esta zona es de 29.3°C con una precipitación media anual de 1524 mm (Junta de Planificación, 2006). El suelo donde se establecieron los experimentos pertenece a la serie Coto (very-fine, kaolinitic isohyperthermic Typic Eutruxox). Es un suelo profundo, de buen drenaje, ligeramente ácido y moderadamente permeable (Gierbolini, 1975).

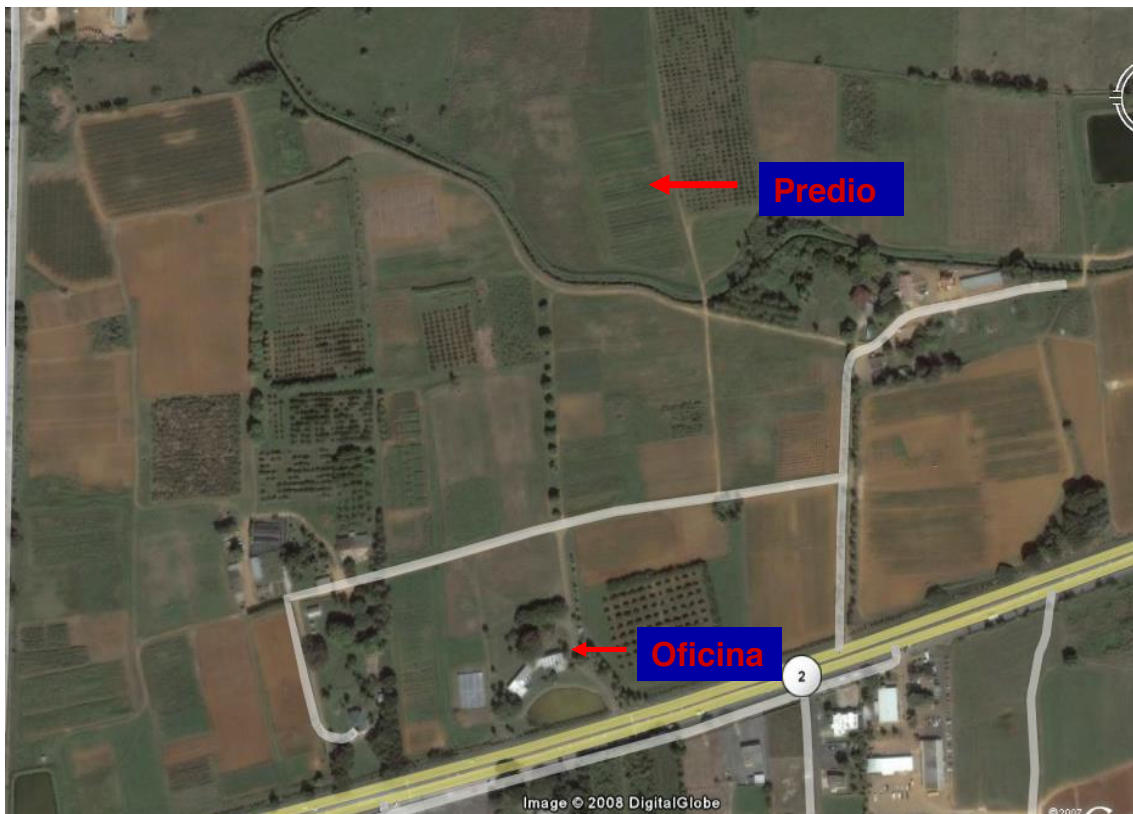


Figura 1: Localización del terreno donde se localizó los ensayos de fertilidad en habichuela, Isabela, 2007 y 2008.

4.2 Experimento 1: Selección de mejores líneas.

4.2.1- Siembra y prácticas culturales

El experimento 1 consistió en la selección de mejores líneas en tres grupos de habichuela (VIDAC rojo, VIDAC negro, Escuela Agrícola Panamericana) y se realizó del 2 de febrero al 29 de abril del 2007. Fue una época con una precipitación de 459 mm, la temperatura media fue de 23.9°C y la velocidad del viento de 8 km h⁻¹. Antes de realizar la investigación se sembró maíz sin abono en el predio y al final del ciclo se cortó el maíz como ensilaje para agotar nutrientes en el suelo. El terreno se aró y se rastrilló según lo recomienda el conjunto tecnológico para la producción de habichuelas de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico (Beaver, 2006). Antes de la siembra se usó el herbicida preemergente dual (S-Metolachlor) a una dosis de 1 L ha⁻¹. Al momento de la siembra se aplicó un fertilizante granular de fórmula 10-10-10 a razón de 500 kg ha⁻¹. Después de la siembra se regó con un riego aéreo el campo para asegurar una buena germinación. A los 15 días de la siembra se removieron las malezas mecánicamente utilizando una cultivadora y luego de un mes se hizo otro desyerbo manual. El control de plagas y de enfermedades se realizó según las recomendaciones del conjunto tecnológico para la producción de habichuelas (Beaver, 2006).

4.2.2- Tratamientos.

Noventa y tres líneas con granos rojos pequeños del ensayo regional de la Escuela Agrícola Panamericana de Honduras denominado Vivero de Adaptación Centroamericano (VIDAC) (Cuadro 1), 59 líneas con granos negros del ensayo regional VIDAC (Cuadro 2) y 76 líneas de habichuela desarrolladas por el programa de mejoramiento de la Escuela Agrícola Panamericana de Honduras (Cuadro 3) constituyeron los tratamientos usados en este experimento. La mayoría de estas líneas, fueron seleccionadas para adaptación a condiciones de baja disponibilidad de P y sequía por el Programa de Investigaciones en Habichuela de la Escuela Agrícola Panamericana de Honduras (Singh et al, 2001a; Singh et al, 2001b; Rosas et al, 2004).

Cuadro 1: Líneas de VIDAC Rojo evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Pedigrí	Líneas	Pedigrí
MR 14148-6	(SEA21XRAB623)F1X9653-16 B-1/-MC-MC	IBC 306-34	Amadeus 77/Rojo de Seda
ALS 9951-101-R1	TC-75//TC-75/G 06727	IBC 306-44	Amadeus 77/Rojo de Seda
ALS 9951-92-R2	TC-75//TC-75//TC-75/G 06727	IBC 306-55	Amadeus 77/Rojo de Seda
PR0310-222-2	VAX 6/PR9607-29	IBC 306-62	Amadeus 77/Rojo de Seda
PR0310-244-2	VAX 6/PR9607-29	IBC 306-77	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2212-28	Milenio/Amadeus 77	IBC 306-79	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2212-35	Milenio/Amadeus 77	IBC 306-80	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2224-5	Amadeus 77 / Rojo Lila	IBC 306-81	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2225-74	Bribri / Amadeus 77	IBC 306-85	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2226-10	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 306-93	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2226-12	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 306-95	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2226-23	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 306-97	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2226-24	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 306-109	Amadeus 77/Rojo de Seda
MER 2226-28	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 307-7	TC-75/Cincuentaño
MER 2226-29	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 308-1	Amadeus 77/Cincuentaño
MER 2226-35	SRC 1-12-1-47 / Amadeus 77	IBC 308-7	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-52	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-15	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-53	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-21	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-144	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-24	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-152	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-25	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-181	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-26	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-182	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-67	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 301-204	Amadeus 77// Amadeus 77/Paraisito	IBC 308-83	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 302-29	Carrizalito// Carrizalito /Paraisito	IBC 308-85	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 305-6	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	IBC 308-103	Amadeus 77/Cincuentaño
IBC 305-11	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	IBC 309-12	Carrizalito /Cincuentaño
IBC 305-35	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	IBC 309-23	Carrizalito /Cincuentaño
IBC 305-44	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	RBF 2-1	A774/RAB655
IBC 305-67	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	RBF 11-28	IBC 301/RBF 1
IBC 306-21	Amadeus 77// Amadeus 77/Saca pobres	RBF 11-29	IBC 301/RBF 1
RBF 11-30	IBC 301/RBF 1	RBF 16-16	IBC 306/RBF 6
RBF 11-71	IBC 301/RBF 1	RBF 16-71	IBC 306/RBF 6
RBF 11-84	IBC 301/RBF 1	RBF 16-82	IBC 306/RBF 6
RBF 12-5	IBC 302/RBF 2	RBF 18-18	IBC 308/RBF 4
RBF 12-49	IBC 302/RBF 2	RBF 18-32	IBC 308/RBF 4
RBF 12-54	IBC 302/RBF 2	RBF 18-64	IBC 308/RBF 4
RBF 12-72	IBC 302/RBF 2	RBF 18-72	IBC 308/RBF 4
RBF 13-31	IBC 303/RBF 3	RBF 19-116	IBC 309/RBF 4
RBF 13-75	IBC 303/RBF 3	PR0340-3-3-1	BelDakMiRMR17//MUS83/DOR483
RBF 14-80	IBC 304/RBF 4	0340-26-3-3	BelDakMi RMR-18//PR 9443-4
RBF 15-38	IBC 305/RBF 5	0348-174-1-4	BelDakMi RMR 17 / Bribri
RBF 16-8	IBC 306/RBF 6	0348-174-2-1	BelDakMi RMR 17 / Bribri
RBF 16-12	IBC 306/RBF 6	0348-186-1-6	BelDakMi RMR 18 / Bribri
PR9607-29	MUS 83/DOR483	VAX 3	A 769///A 775//ICA Pijao/ G 40001///XAN 309

Cuadro 2: Líneas de VIDAC Negro evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Pedigrí	Líneas	Pedigrí
PPB 22-40	Vaina blanca//DICTA 151/Tío Canela-75	RBF 15-70	IBC 305/RBF 5
BCN 20-02-49	DOR 390/SRC 2-23	RBF 19-63	IBC 309/RBF 4
BCN 20-02-81	DOR 390/SRC 2-23	RBF 19-69	IBC 309/RBF 4
BCN 20-02-82	DOR 390/SRC 2-23	RBF 20-86	IBC 309 / RBF 9
BCN 20-03-42	DOR 500/SRC 2-28	EA 3	HT 7719 / A 55
BCN 20-03-62	DOR 500/SRC 2	X02-33-147-1	
BCN 20-03-82	DOR 500/SRC 2	X02-33-163-1	
BCN 20-07-65	ICTA Ostua/Icta Ligero	X02-33-161	
ALS 20-20-36	TC-75/ALS 3	X02-33-159-1	
MN 14059-7	(FEB 192 x G21212)F1 x Icta Ligero/-MC-MC	X02-33-157	
MH-9-12	MUS N-8//EAP 9503-32 ^a	X02-33-163-2	
MR 14145-36	(TAR4xSEA18)F1xTío canela 75/-MC-MC	X02-33-159-2	
MR 14212-6	(SEA15/OstuaRC) / (Tío Canela/(Feb192/G21212))	X02-33-147-2	
PR-0333-8	VAX 6 / Morales	X02-33-153	
PR-0333-27	VAX 6 / Morales	X02-33-147-3	
PR-0333-30	VAX 6 / Morales	XRAV-40-3	
PR-0333-90	DOR 668 / BELMIDAK RR1	XRAV-40-4	
PR-0333-104	G21212///DOR483/BELNEB//MUS83/DOR483	XRAV-63-8	
PR-0333-169	ICB-3 / PR9609-128-3	XRAV-68-1	
PR-0334-59	Negro Tacana / PR 9609-16-3	XRAV-71-2	
PR-0334-121	XAN 176 / 1074	XRAV-96-11	
SRS 66-1	SRC 1-12-1 / B 98311	XRAV-117-2	
MEN 2201-64	Icta Ligero / Raven	XRAV-117-3	
MEN 2202-72	BCN 20-03 / W 98311	XRAV-169-3	
MEN 2207-44	DOR 390 / BCH 9901-60	XRAV-187-3	
MEN 2207-66	DOR 390 / BCH 9901-60	RBF 11-36	IBC 301/RBF 1
MER 222-27	Amadeus 77 / Raven	RBF 11-60	IBC 301/RBF 1
RBF 7-25	L88-30 / G 3513	RBF 14-34	IBC 304/RBF 4
RBF 11-33	IBC 301/RBF 1	RBF 14-54	IBC 304/RBF 4
RBF 15-17	IBC 305/RBF 5		

Cuadro 3: Líneas de la Escuela Agrícola Panamericana evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Pedigrí	Líneas	Pedigrí
IBC-301-52	Amadeus 77/Paraisito	RBF-2-1	RAB 651/SEA 5
IBC-301-53	Amadeus 77/Paraisito	RBF-11-28	IBC 301/RBF 1
IBC-301-144	Amadeus 77/Paraisito	RBF-11-29	IBC 301/RBF 1
IBC-301-152	Amadeus 77/Paraisito	RBF-11-71	IBC 301/RBF 1
IBC-301-181	Amadeus 77/Paraisito	RBF-11-84	IBC 301/RBF 1
IBC-301-182	Amadeus 77/Paraisito	RBF-12-5	IBC 302/RBF 2
IBC-301-204	Amadeus 77/Paraisito	RBF-12-49	IBC 302/RBF 2
IBC-302-29	Carrizalito/Paraisito	RBF-12-54	IBC 302/RBF 2
IBC-305-6	Amadeus 77/Saca pobres	RBF-12-72	IBC 302/RBF 2
IBC-305-11	Amadeus 77/Saca pobres	RBF-13-31	IBC 303/RBF 3
IBC-305-35	Amadeus 77/Saca pobres	RBF-13-75	IBC 303/RBF 3
IBC-305-44	Amadeus 77/Saca pobres	RBF-14-26	IBC 304/RBF 4
IBC-305-67	Amadeus 77/Saca pobres	RBF-14-28	IBC 304/RBF 4
IBC-306-21	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-14-65	IBC 304/RBF 4
IBC-306-34	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-14-80	IBC 304/RBF 4
IBC-306-44	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-15-38	IBC 305/RBF 5
IBC-306-55	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-8	IBC 306/RBF 6
IBC-306-62	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-2	IBC 306/RBF 6
IBC-306-77	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-6	IBC 306/RBF 6
IBC-306-79	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-22	IBC 306/RBF 6
IBC-306-80	Amadeus 77/Rojo de seda	IBC-309-12	Carrizalito/ Cincuentaño
IBC-306-85	Amadeus 77/Rojo de seda	IBC-309-13	Carrizalito/ Cincuentaño
IBC-306-93	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-49	IBC 306/RBF 6
IBC-306-95	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-71	IBC 306/RBF 6
IBC-306-97	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-16-82	IBC 306/RBF 6
IBC-306-109	Amadeus 77/Rojo de seda	RBF-17-49	IBC 307/RBF 7
IBC-307-7	TC-75/Cincuentaño	RBF-18-32	IBC 308/RBF 4
IBC-308-1	Amadeus 77/ Cincuentaño	RBF-18-64	IBC 308/RBF 4
IBC-308-7	Amadeus 77/ Cincuentaño	RBF-18-72	IBC 308/RBF 4
IBC-308-15	Amadeus 77/ Cincuentaño	RBF-19-116	IBC 309/RBF 4
IBC-308-21	Amadeus 77/ Cincuentaño	Amadeus 77	Tío canela/DICTA 105
IBC-308-24	Amadeus 77/ Cincuentaño	SEA 5	BAT 477/San Cristóbal 83/ Guanajuato 31/Rio Tibagi
IBC-308-25	Amadeus 77/ Cincuentaño	Verano	DOR364/WBB-20-1//Don Silvio/VAX 6
IBC-308-26	Amadeus 77/ Cincuentaño	PR-0443-151	
IBC-308-67	Amadeus 77/ Cincuentaño	PR-0301-181	
IBC-308-83	Amadeus 77/ Cincuentaño	BAT 477	
IBC-308-85	Amadeus 77/ Cincuentaño	SER 16	
IBC-308-103	Amadeus 77/ Cincuentaño	A774	

4.2.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue un diseño de bloques completos aleatorizados con 6 replicados. Un surco sencillo de una línea con un largo de 1 m representó la unidad experimental. Se sembraron 10 semillas por surco. La distancia entre surco fue de 60 cm y entre plantas de 10 cm para una densidad de siembra de 166,167 plantas ha⁻¹.

4.2.4 Características evaluadas

En este experimento se evaluó el comportamiento agronómico de las líneas bajo las condiciones agroclimatológicas del noroeste de Puerto Rico. Los datos colectados fueron rendimiento en grano, número de plantas cosechadas y resistencia a roya (*Uromyces phaseoli*). El rendimiento en grano, se obtuvo para cada línea individualmente conforme iban madurando fisiológicamente. Se secaron las vainas hasta aproximadamente 12% de humedad, se desgranaron y se pesaron. La resistencia a roya se evaluó al momento de la floración (42 días después de siembra) midiendo el porcentaje de área infectado en la hoja y el tamaño de la pústula usando una escala visual en donde 1=no pústula, 2=puntos necróticos, 3=diámetro de la pústula <300 µm, 4= diámetro de la pústula entre 300 y 500 µm, 5= diámetro de la pústula entre 500-800 µm, 6= diámetro de la pústula >800 µm (Stavely et al., 1983).

4.2.5 Análisis estadísticos

El rendimiento en grano y el número de plantas cosechadas fueron evaluadas mediante análisis de varianza usando el procedimiento PROC MIXED del paquete estadístico SAS versión 9.1.3 service pack 3 (SAS Institute, 2003). La separación de medias se hizo mediante la prueba de TUKEY con un intervalo de confianza de 95%.

4.3 Experimento 2: Selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P.

En el experimento 2 se evaluaron en dos ensayos la respuesta y la eficiencia agronómica de 38 líneas (36 líneas seleccionadas en el experimento 1 mas dos testigos locales) bajo tres tratamientos de fertilidad (completo, menos N y menos P). El objetivo fue determinar cuales de estas líneas fueron eficientes en la adquisición de N y de P.

4.3.1 Ensayo 1: Junio 2007

4.3.1.1- Siembra y prácticas culturales

El ensayo 1 del experimento 2 se realizó del 7 de junio al 31 de agosto del 2007. Durante esta época la precipitación total fue de 197 mm, la temperatura media de 26.3°C y la velocidad media del viento de 8.4 km h⁻¹. La preparación del terreno se hizo según las recomendaciones del conjunto tecnológico para la producción de habichuelas (Beaver, 2006). Se realizaron las mismas practicas culturales (siembra, aplicación de riego, control de plagas y enfermedades) descritas en el experimento 1. Pero al contrario del experimento 1, todas las parcelas fueron inoculadas con el inoculante N-DURE (INTX Microbials, LLC, Kentlan, IN 47951) conteniendo 200 x 10⁶ células viables *Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli* g⁻¹. La dosis de inoculación fue de 1.2 g por parcela de 2.4 m² correspondiente a una dosis de 5 kg/ha.

4.3.1.2- Tratamientos.

La fertilidad y las 38 líneas consistieron los tratamientos evaluados en este ensayo. Se usaron tres tratamientos de fertilidad. El primer tratamiento (completo) consistió en la aplicación de 50 kg N ha⁻¹, 57 kg P₂O₅ ha⁻¹ y 54 kg K₂O ha⁻¹ en forma de urea, superfosfato triple (SFT) y cloruro de potasio (KCl) respectivamente. El segundo tratamiento (menos P) consistió en la aplicación de 50 kg N ha⁻¹ y 54 kg K₂O ha⁻¹ en forma de urea y KCl respectivamente. El tercer

tratamiento (menos N) consistió en la aplicación de 57 kg P_2O_5 ha⁻¹ y 54 kg K_2O ha⁻¹ en forma de SFT y de KCl respectivamente.

Se comparó con las 36 líneas seleccionadas en el experimento 1 dos testigos: la variedad de grano blanco 'Morales' proveniente de Puerto Rico y la variedad de grano rojo moteado pequeño 'Salagnac 90' proveniente de Haití. El primero testigo, Morales, proviene del cruce 'Arroyo Loro x Don Silvio' y fue desarrollado y liberado en 1998 por la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico (Beaver y Miklas, 1999). La línea posee un tipo de crecimiento indeterminado de tipo II con semillas pequeñas de color blanco, deseables para la producción de habichuela seca y verde, además es resistente al virus del mosaico común (BCMV) y al virus del mosaico dorado (BGMV) (Beaver y Miklas, 1999). El segundo testigo, Salagnac 90, es una línea pura desarrollada en 1990 en la Estación Experimental de Salagnac, Haití por la combinación de varias líneas locales por su resistencia a enfermedades foliares como el oidium causado por el hongo *Erysiphe polygoni* (Clermont-Dauphin et al., 2003). Salagnac 90 posee un hábito de crecimiento indeterminado de tipo III con un ciclo de 70 días bajo las condiciones climáticas de Haití. Es de origen mesoamericano y de color rojo moteado. Puede rendir hasta 1700 kg/ha en condiciones óptimas (Duran et al., 2005).

4.3.1.3 Diseño experimental

Para este ensayo se usó un arreglo de parcelas divididas con un diseño de bloques completos aleatorizados con cinco replicados. Los tres tratamientos de fertilidad constituyeron las parcelas completas y las 38 líneas de habichuela fueron las subparcelas. Un surco sencillo por línea con un largo de 4 m representó la unidad experimental (subparcela). Se sembraron 40 semillas por surco. La distancia entre surcos fue de 60 cm y 10 cm entre plantas dentro de los surcos.

4.3.1.4 Características evaluadas

En este ensayo se evaluó la respuesta y la eficiencia agronómica de las 38 líneas en los tres tratamientos de fertilidad mediante el rendimiento en grano y otros parámetros derivados de este tales como eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU), rendimiento relativo (RR) y porcentaje de adaptabilidad (Ad). Se colectaron los datos de rendimiento en grano como descritos en el experimento 1. Un rendimiento menor de 1000 kg ha⁻¹ se clasificó como bajo, entre 1000 y 1500 kg ha⁻¹ mediano y un rendimiento mayor a 1500 kg ha⁻¹ se clasificó como alto. La eficiencia agronómica (EA) se define como el rendimiento adicional obtenido por unidad de fertilizante aplicado. De manera general mide la respuesta de una línea a aplicaciones de fertilizantes (Baligar et al., 2001; Fageria y Filho, 2007; Dos Santos y Fageria, 2007; Syers et al., 2008). Existen varios métodos para determinar la EA, entre los más importantes están los métodos de la diferencia y del balance. El método de la diferencia, lo más universalmente utilizado, usa los rendimientos (R) en las parcelas con (completo) y sin el nutriente (-F) y se calcula:

$$(EA)_{-F} = \frac{R_{\text{completo}} - R_{-F}}{\text{Nivelaplicacion}}$$

Mientras mayor es el valor de la EA mayor es la respuesta de la línea a la aplicación del nutriente. Según sugerido por Dos Santos y Fageria (2007) una línea con una EA mayor de 12 es respondedora mientras que una línea con una EA menor de 12 se considera que no responde.

El método del balance usa la concentración (C) de nutrientes (N y/o P) en los tejidos de la planta y la cantidad de fertilizante aplicado, se calcula así:

$$(EA)_F = \frac{C_F}{\text{Nivelaplicacion}}$$

En este ensayo, se utilizó el método de la diferencia ya que no colectamos datos de concentración de nutrientes en el tejido.

La eficiencia de uso (EU) se define como la producción de granos por unidad de nutrientes disponibles en el suelo (Muurinen, 2007). La EU describe la habilidad de una línea para extraer nutrientes del suelo y convertirlos en grano

(Dos Santos y Fageria, 2007). De manera general mide la eficiencia de una línea en ausencia de un nutriente y se calcula usando el rendimiento (R) en ausencia del nutriente (R_{-F}) y el nivel de nutriente disponible en el suelo (n_{suelo}). En este caso, se cuantifico el N ($\text{NO}_3\text{-N}$) del suelo por medio de una extracción con una solución 1M KCl y colorimetría (MDS Harris, 2007):

$$(EU)_{-F} = \frac{R_{-F} (kg\,ha^{-1})}{n_{\text{suelo}} (kg\,ha^{-1})}$$

Mientras mayor es el valor de EU mas eficiente es la línea en la adquisición de nutrientes y según sugerido por Muurinen (2007) una línea con una EU mayor de 30 es eficiente y menor de 30 es ineficiente.

El rendimiento relativo (RR) es el rendimiento (R) con todos los nutrientes menos el nutriente de interés (R_{-F}) dividido por el rendimiento obtenido con las cantidades optimas de nutrientes ($R_{\text{potencial}}$) (Loboski et al., 2008). Se expresa en porcentaje y se calcula mediante:

$$RR = \frac{R_{-F}}{R_{\text{potencial}}} \times 100$$

El porcentaje de adaptabilidad (Ad) mide la capacidad de un genotipo para adaptarse a varias condiciones en ambientes diferentes, se define como la proporción de ambientes (N) en los cuales el rendimiento de una línea dada es superior al rendimiento promedio de todas las líneas incluidas en el experimento (St Pierre et al., 1967). Se calcula según la formula:

$$Ad = \frac{N}{m} \times 100 ,$$

donde N es la cantidad de ambientes en los cuales el rendimiento de la línea es superior al rendimiento promedio de todas las líneas en estos ambientes y m es la cantidad total de ambientes.

En este ensayo también se evaluó el peso específico de la semilla al seleccionar al azar 100 semillas en cada parcela cosechada y se determinó su peso. Este componente de rendimiento se usó para clasificar las semillas en pequeña (<30 g), mediana (30-40 g) y grande (>40 g) (Pastor-Corrales, 1987).

Se evaluó también el contenido de nutrientes en el suelo. Antes de la siembra, se tomó a una profundidad de 15 cm una muestra de suelo en todas las repeticiones de las parcelas completas. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas por una malla <2 mm y enviadas al laboratorio MDS Harris (Lincoln, Nebraska, USA) para análisis de pH, NO₃-N, P extraíble, Ca, Mg, K intercambiable y micronutrientes. El NO₃-N se extrajo con una solución 1M KCl y se determinó mediante colorimetría. El P extraíble se extrajo con una solución Bray-1 (0.025N HCl + 0.03N NH₄F) y se cuantificó por colorimetría con cloruro estanoso. Los cationes Ca, Mg y K se extrajeron con acetato de amonio y se cuantificaron por absorción atómica. Los micronutrientes (Zn, Mn, Fe, Cu) se extrajeron con DTPA. El pH se determinó en una solución 1:1 agua/suelo. La materia orgánica (MO) se cuantificó por pérdida por ignición (MDS Harris, 2007).

4.3.1.5 Análisis estadísticos

Las variables evaluadas en este ensayo (rendimiento en grano, contenido de nutrientes en el suelo, peso específico de semillas) fueron analizadas mediante ANOVA usando el procedimiento PROC MIXED del programa estadístico SAS versión 9.1.3 service pack 3 (SAS Institute, 2003). Para el rendimiento en grano la separación de medias entre líneas dentro de los tratamientos de fertilidad se hizo mediante la prueba de TUKEY con un intervalo de confianza de 95%, la separación de medias entre los tratamientos de fertilidad dentro de las líneas se hizo mediante contrastes. Para el contenido de nutrientes en el suelo y el peso específico la separación de medias se hizo mediante la prueba de TUKEY. Las relaciones entre el rendimiento y los otros variables tales como EA, EU, pH del suelo, NO₃-N, P y peso específico de semillas se determinaron mediante regresiones lineales usando el programa estadístico Infostat versión 2007.3 (Infostat, 2007).

4.3.2 Ensayo 2: Enero 2008

El ensayo dos del experimento dos se sembró del 23 de enero al 29 de abril del 2008. Durante esta época la precipitación total fue de 207 mm, la temperatura media de 21.8°C y la velocidad media del viento de 10.8 km h⁻¹. Se usó las mismas prácticas culturales, los mismos tratamientos, el mismo diseño experimental, se evaluaron las mismas variables excepto el peso específico de semillas que los usados en el ensayo 1.

4.4 Experimento 3: Caracterización de la arquitectura del sistema radicular.

4.4.1- Siembra, prácticas culturales y tratamientos

En el experimento 3 se caracterizó la arquitectura del sistema radicular de las líneas mas prometedoras del ensayo 1 del experimento 2: VAX 3, PR0443-151, SER 16 y los dos testigos: Morales y Salagnac 90. Este experimento se sembró paralelamente al segundo ensayo del experimento dos, del 24 de enero al 13 de marzo 2008. Se usaron las mismas prácticas culturales descritas en el experimento dos. Las cinco líneas antes mencionadas y los tres tratamientos de fertilidad descritos en el experimento dos fueron los tratamientos evaluados en este experimento. El diseño experimental fue un arreglo de parcelas divididas en un diseño de bloques completos aleatorizados con tres replicados en donde los tres tratamientos de fertilidad constituyeron las parcelas completas y las cinco líneas las subparcelas.

4.4.2- Características evaluadas

Se determinaron las características del sistema radicular de estas cinco líneas mediante dos métodos.

a) Al momento de la floración (42 días después de la siembra), se seleccionaron dos plantas enteras y se excavó el sistema radicular. La parte aérea fue secada a 60°C durante tres días y pesada para determinar la biomasa de la parte aérea. Se lavó cuidadosamente la parte radicular en agua destilada para quitar las partículas del suelo y se almacenó en una solución de 25% v/v de alcohol para análisis posteriores. Se seleccionaron raíces laterales y la raíz principal y se tomó una submuestras de cada parte. La submuestras fue de

aproximadamente el 15% que corresponde a una cantidad suficiente para estimar las características del sistema radicular (Araujo et al., 2004). Cada submuestra se montó en una bandeja acrílica llenada de agua sobre un escáner (HP STD 4800, Epson Perfection V700), con un sistema especial de luz (Dual Scan) para eliminar sombras y se tomó una imagen digital del sistema radicular. Las imágenes escaneadas fueron analizadas con el programa WinRhizo Basic 2007d (Regents Instruments, Québec, Canada) como descrito por Bouma et al. (2000) para longitud de las submuestras. Después del escaneo, las submuestras y el resto del sistema radicular fueron secados a parte a 60°C durante tres días y pesados para determinar peso seco de raíz. Se usó la longitud de la muestra (L_m), el peso seco de la muestra (P_m) y el peso seco total (P_t) para determinar la longitud total (L_t) del sistema radicular según la relación (Araujo et al, 2004):

$$L_t = \frac{P_t}{P_m} \times L_m$$

con peso seco total (P_t) = peso seco submuestras + peso seco del resto de la raíz.

Se uso también el peso seco total de la raíz (P_t) y la biomasa aérea (B) para determinar la razón peso seco raíz: vástago (Δpv):

$$\Delta pv = \frac{P_t}{B}$$

Este método se usó para determinar longitud radicular por tipo de raíz (principal y lateral)

b) En el segundo método se obtuvo una muestra intacta de suelo con un barreno de 5 cm de diámetro (Gridings Prob, Ft Collins, Co.). La muestra se obtuvo a una distancia de 2 cm de la planta y una profundidad de 40 cm. El cilindro se dividió en tres partes (0-15 cm, 15-30 cm, >30 cm) para obtener tres submuestras que fueron lavadas en agua y conservadas en una solución de 25% v/v de alcohol. Las raíces fueron montadas en el mismo escáner y analizadas con WinRhizo como descrito anteriormente para obtener la longitud. Después del escaneo, las submuestras fueron secadas a 60°C durante tres días

y pesados para determinar peso seco de raíz. Este método se usó para determinar longitud radicular por profundidad.

4.4.3 Análisis estadísticos

Las variables evaluadas en este experimento (biomasa aérea, peso seco raíz, longitud radicular por tipo y por profundidad) fueron analizadas mediante ANOVA usando el procedimiento PROC MIXED del programa estadístico SAS versión 9.1.3 service pack 3 (SAS Institute, 2003). La separación de medias entre líneas dentro de los tratamientos de fertilidad se hizo mediante la prueba de TUKEY con un intervalo de confianza de 95%, la separación de medias entre los tratamientos de fertilidad dentro de las líneas se hizo mediante contrastes. Las relaciones entre el rendimiento y estas tres variables se determinaron mediante regresiones lineales usando el programa estadístico Infostat versión 2007.3 (Grupo Infostat, 2007).

4.5 Experimento 4: Adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido a estrés de nutrientes.

En un cuarto experimento, se evaluó, en dos ensayos el comportamiento de seis líneas hermanas de habichuela, de sistema radicular conocido (superficial, mixto, profundo) y nueve combinaciones de mezclas de semilla de las mismas bajo condiciones de estrés de nutrientes. El objetivo fue determinar cual tipo de sistema radicular se adapta mejor a condiciones de estrés de nutrientes.

4.5.1 Ensayo 1: febrero 2007

4.5.1.1- Siembra, prácticas culturales y tratamientos

El ensayo 1 del cuarto experimento se sembró del 14 de febrero al 2 de mayo del 2007. Se usaron las mismas prácticas culturales que en el experimento 1. Las seis líneas hermanas de habichuela mas las nueve combinaciones de mezclas de semillas de las mismas (Cuadro 4) y dos tipos de fertilidad consistieron los tratamientos evaluados en este experimento. Las seis líneas

hermanas provienen del cruce 'B98311 x TLP19'. El primer padre, B98311, desarrollado por la Universidad del Estado de Michigan, es una línea Mesoamericana resistente a sequía. La línea B98311 posee un hábito de crecimiento tipo II y un sistema radicular vigoroso y profundo (Frahm et al., 2004). El segundo padre es también de origen Mesoamericano pero fue desarrollado para tolerancia a bajo fósforo por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) con un hábito de crecimiento tipo II (Lynch, 2005). Los dos tratamientos de fertilidad fueron sin fertilizante (baja fertilidad) y la aplicación del fertilizante granular 10-10-10 a razón de 500 kg ha⁻¹ (alta fertilidad).

Cuadro 4: Líneas L88 seleccionadas para el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular diferentes a estrés de nutrientes, Isabela, febrero 2007.

Línea	Característica del sistema radicular
L88-43	Superficial
L88-57	Superficial
L88-14	Superficial
L88-14 (25%) - L88-43 (75%)	Superficial
L88-14 (50%) - L88-43 (50%)	Superficial
L88-14 (75%) - L88-43 (25%)	Superficial
L88-30 (25%) - L88-57 (75%)	Mixto
L88-30 (50%) - L88-57 (50%)	Mixto
L88-30 (75%) - L88-57 (25%)	Mixto
L88-30	Profundo
L88-63	Profundo
L88-67	Profundo
L88-63 (25%) - L88-67 (75%)	Profundo
L88-63 (50%) - L88-67 (50%)	Profundo
L88-63 (75%) - L88-67 (25%)	Profundo

4.5.1.2- Diseño experimental.

El arreglo experimental fue de parcelas divididas de bloques completos aleatorizados con cuatro replicados. La fertilización representó las parcelas completas y las líneas puras y/o combinaciones de líneas puras las subparcelas. Tres surcos por línea y fertilización con un largo de 2 m por surco constituyeron la unidad experimental. La distancia entre surco fue de 0.6 m y entre plantas de

0.1 m. El área de la unidad experimental (subparcela) fue de 3.6 m² (3 surco x 0.6 m entre surco x 2 m de largo del surco) y de una parcela completa de 54 m² (15 subparcelas x 3.6 m²).

4.5.1.3- Características evaluadas

Para este ensayo se evaluó el rendimiento en grano y otros componentes derivados del rendimiento. A medida que las líneas de habichuela se iban madurando fisiológicamente se cosechó el surco central de cada unidad experimental (subparcela), se secaron las vainas hasta 12% de humedad y luego se pesaron para determinar el rendimiento. Se determinaron otros parámetros derivados del rendimiento tales como eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU) y rendimiento relativo (RR) según los procedimientos descritos en el ensayo uno del experimento dos.

Se evaluó también el contenido de nutrientes en las hojas. Al momento de la floración se tomó en cada planta del surco central de cada subparcela una hoja indicadora (hoja opuesta a un eje floral). Las hojas fueron lavadas con agua destilada, secadas durante tres días a 60° C molidas y enviadas al laboratorio para la determinación de macronutrientes (N, P, K) y micronutrientes (Ca, Mg, S, Mn). La concentración de N en las hojas fue determinada por la digestión de 0.2 g de muestra en ácido sulfúrico seguida de destilación y titulación de acuerdo al método Kjeldhal (Black, 1995). La concentración de P fue determinada por espectrofotometría después de la digestión de 0.2 g de muestra en una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Murphy y Riley, 1962). El contenido de K, Mg, Ca y Mn fue determinado por absorción atómica después de digestión en 2% de ácido acético (MDS Harris, 2007)

4.5.1.4 Análisis estadísticos

Las variables evaluadas en este experimento (rendimiento en grano, concentración de nutrientes) fueron analizadas mediante ANOVA usando el procedimiento PROC MIXED del programa estadístico SAS versión 9.1.3 service pack 3 (SAS Institute, 2003). La separación de medias entre líneas dentro de los

tratamientos de fertilidad se hizo mediante la prueba de TUKEY con un intervalo de confianza de 95%, la separación de medias entre los tratamientos de fertilidad dentro de las líneas se hizo mediante contrastes. Las relaciones entre el rendimiento y la concentración de nutrientes (N, P, S) se determinaron mediante regresiones lineales usando el programa estadístico Infostat versión 2007.3 (Grupo Infostat, 2007).

4.5.2 Ensayo 2: enero 2008.

El ensayo 2 del experimento 4 se sembró del 24 de enero al 2 de mayo del 2008, se usaron las mismas prácticas culturales, diseño experimental y colección de datos que en el ensayo 1.

5. Resultados y discusión

5.1. Experimento 1: Selección de mejores líneas

5.1.1 Rendimiento en grano y susceptibilidad a roya.

Para el experimento de selección de las mejores líneas se encontraron diferencias significativas ($p < 0.01$) para los tres ensayos: VIDAC rojo, VIDAC negro y líneas de la Escuela Panamericana (Cuadro 5).

Cuadro 5: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Fuente variación	Ensayos					
	VIDAC rojo		VIDAC negro		Escuela panamericana	
Líneas	F-valor	p-valor	F-valor	p-valor	F-valor	p-valor
	5.23	<0.0001	5.05	<0.0001	3.19	<0.0001
CV (%)	25.5		25.8		31.8	

En el ensayo de las líneas VIDAC rojo, el rendimiento en grano varió entre 917 kg ha^{-1} y 2609 kg ha^{-1} y la infección a roya varió de 1 a 10% (Apéndice 1). En este ensayo se escogió para el segundo experimento las ocho mejores líneas que tuvieron la combinación de los mejores rendimientos y mayor resistencia a roya (Cuadro 6)

Cuadro 6: Líneas VIDAC rojo seleccionadas en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Línea	Rendimiento kg ha ⁻¹	Resistencia roya	
		Infección (%)	Pústula
VAX 3	2,609	1.0	6.0
PR0340-3-3-1	2,496	0.0	1.0
MER 2226-28	2,181	0.0	1.0
IBC 309-23	2,173	0.0	1.0
IBC 306-95	2,173	2.0	6.0
ALS 9951-101-R1	2,167	1.0	6.0
IBC 308-15	2,073	0.0	1.0
MER 2212-28	1,942	0.0	1.0
DMS Tukey.05	937		

El tamaño de la pústula se calcula usando una escala visual en donde 1=no pústula, 2=puntos necróticos, 3=diámetro de la pústula <300 µm, 4= diámetro de la pústula entre 300 y 500 µm, 5= diámetro de la pústula entre 500-800 µm, 6= diámetro de la pústula >800 µm (Stavely et al., 1983).

En el caso del ensayo de las líneas VIDAC negro, los rendimientos fueron ligeramente menores que las líneas VIDAC rojo y variaron entre 714 kg ha⁻¹ y 1817 kg ha⁻¹ y tendieron a ser más resistentes a la roya, con valores de infección entre 0 y 2% y tamaño de pústula de 1 a 6 (Apéndice 2). Por esta razón se escogió en este ensayo 14 líneas para el segundo experimento (Cuadro 7).

Cuadro 7: Líneas VIDAC negro seleccionadas en el experimento de selección de mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Línea	Rendimiento kg ha ⁻¹	Resistencia roya	
		Infección (%)	Pústula
MN 14059-7	1,817	2.0	1.0
RBF 11-36	1,800	1.5	2.0
RBF 11-33	1,767	3.0	6.0
RBF 14-54	1,786	1.5	3.0
MEN 2207-44	1,739	1.5	6.0
MEN 2201-64	1,725	1.0	1.0
RBF 15-17	1,692	2.0	2.0
RBF 14-34	1,645	1.0	2.0
XRAV 117-2	1,634	2.5	3.0
RBF 19-63	1,606	2.0	3.0
PR 033-27	1,598	2.0	2.0
X02-33-147-3	1,553	1.5	1.0
XRAV 96-11	1,539	1.5	1.0
XRAV 71-2	1,245	2.0	1.0
DMS Tukey.05	816		

El tamaño de la pústula se calcula usando una escala visual en donde 1=no pústula, 2=puntos necróticos, 3=diámetro de la pústula <300 µm, 4= diámetro de la pústula entre 300 y 500 µm, 5= diámetro de la pústula entre 500-800 µm, 6= diámetro de la pústula >800 µm (Stavely et al., 1983).

Para el ensayo de las líneas de la Escuela Panamericana, los rendimientos variaron entre 767 kg ha⁻¹ y 2153 kg ha⁻¹ (Apéndice 3). En este grupo se escogieron doce líneas para el segundo experimento (Cuadro 8). Algunas líneas como SEA 5, BAT 477 y 'Verano' no tuvieron buenos rendimientos y mostraron cierta susceptibilidad a la roya, pero fueron escogidos porque son materiales liberados y están siendo usados por agricultores de Centro America, estos sirvieron como testigos al igual que Morales provenientes de Puerto Rico y Salagnac 90 de Haití.

Cuadro 8: Líneas de la escuela Panamericana seleccionadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Línea	Rendimiento kg ha ⁻¹	Resistencia roya	
		Infección (%)	Pústula
A774	2,153	1.0	3.0
RBF 11-29	2,037	1.5	4.0
IBC 309-13	2,028	2.5	6.0
Amadeus 77	1,795	2.0	6.0
IBC 305-67	1,781	1.0	3.0
IBC 301-182	1,770	2.0	6.0
PR 0443-151	1,748	2.0	6.0
SER 16	1,698	2.0	6.0
SEA 5	1,236	5.0	6.0
BAT 477	1,075	4.0	6.0
Verano	1,042	4.0	6.0
PR 0301-181	1,020	4.0	6.0
DMS Tukey.05	1,000		

El tamaño de la pústula se calcula usando una escala visual en donde 1=no pústula, 2=puntos necróticos, 3=diámetro de la pústula <300 µm, 4= diámetro de la pústula entre 300 y 500 µm, 5= diámetro de la pústula entre 500-800 µm, 6= diámetro de la pústula >800 µm (Stavely et al., 1983).

5.2. Experimento 2: Selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P.

5.2.1 Rendimiento en grano y eficiencia agronómica.

5.2.1.1 Ensayo 1: junio 2007

Para el rendimiento en grano, se encontró un efecto de la interacción línea x fertilidad ($p < 0.01$), lo que significa que el comportamiento de las líneas esta influenciado por el régimen de fertilidad, y que existe una alta variabilidad genotípica en cuanto a respuesta a fertilizantes nitrogenados y fosfatados (Cuadro 9).

Cuadro 9: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, Junio 07.

Fuente de Variación	GL	GL error	F-valor	p-valor
Fertilidad	2	8	26.63	0.0003
Línea	35	379	8.89	0.0001
Línea x Fertilidad	70	379	1.85	0.0001
CV (%)	-----29.7-----			
GL = Grado de Libertad	CV = Coeficiente de variación			

Cuadro 10: Rendimiento en grano por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de selección de líneas de habichuela bajo estrés de N y de P, Isabela, junio 2007.

Líneas	Completo	Menos P	Menos N
	-----kg ha ⁻¹ -----		
a) líneas con rendimientos donde completo = menos P = menos N			
VAX 3	1,929 a	2,227 a	1,880 a
RBF 19-63	1,686 a	1,958 a	1,511 a
Salagnac 90	1,198 a	1,429 a	831 a
RBF 11-33	984 a	1,289 a	1,122 a
MEN 2201-64	1,274 a	1,347 a	1,043 a
RBF 11-29	1,439 a	1,411 a	983 a

Cuadro 10: continuación

Líneas	Completo	Menos P	Menos N
	-----kg ha ⁻¹ -----		
b) líneas con rendimientos donde completo = menos P > menos N			
Amadeus 77	2,777 a	2,289 a	699 a
PR0443-151	2,544 a	2,821 a	1,707 b
PR0340-3-3-1	2,270 a	2,737 a	820 b
IBC 309-13	2,234 a	1,978 a	776 b
MER2226-28	2,205 a	1,872 a	1,102 b
IBC 309-23	2,184 a	2,183 a	1,258 b
IBC 308-15	2,169 a	2,069 a	1,192 b
A774	2,162 a	2,464 a	1,167 b
Verano	2,078 a	2,128 a	1,337 b
IBC 306-95	2,062 a	2,244 a	729 b
ALS 9951-101-R1	2,049 a	1,811 a	987 b
XRAV 117-2	1,941 a	1,728 a	876 b
RBF 15-17	1,863 a	1,620 a	809 b
MN 14059-7	1,858 a	1,811 a	797 b
MER 2212-28	1,840 a	2,026 a	1,040 b
RBF 14-34	1,794 a	1,780 a	455 b
BAT 477	1,793 a	1,830 a	707 b
Morales	1,764 a	1,621 a	906 b
IBC 305-67	1,762 a	1,823 a	880 b
RBF 14-54	1,567 a	1,633 a	681 b
SEA 5	1,112 a	929 a	479 b
PR 0301-181	1,337 a	1,058 a	610 b
PR 0333-27	1,504 a	1,625 a	1,004 b
X02-33-147-3	1,463 a	1,897 a	846 b
IBC 301-182	1,703 a	1,364 a	621 b
c) líneas con rendimientos donde menos P > completo > menos N			
RBF 11-36	1,603 b	2,034 a	1,028 c
MEN 2207-44	1,728 b	2,508 a	900 c
d) Líneas con rendimientos donde completo > menos P > menos N			
SER 16	3,003 a	1,950 b	911 c
XRAV 71-2	2,258 a	1,679 b	690 c
XRAV 96-11	2,218 a	1,540 b	600 c
Promedio	1,874	1,849	941
DMS _{tukey0.05}	748	748	748

Letras iguales dentro de una misma fila indican no diferencia al 0.05

El DMS sirve para comparar entre columnas

De acuerdo al comportamiento de las líneas en los tres tratamientos de fertilidad se dividieron en cuatro categorías:

- a) Líneas con rendimientos iguales en los tres tratamientos de fertilidad (completo = menos P = menos N).

Seis de las 36 líneas (17%) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los tres tratamientos de fertilidad (Cuadro 10a). En cuanto a estrés de N, parece que estas líneas fueron las mas respondedoras a la inoculación, pues Salagnac 90, RBF 11-29 y VAX 3 tuvieron nodulación de 2, 3 y 3.5 respectivamente correspondiente a un promedio de mas de 80 nódulos/planta en un estudio realizado en el mismo suelo y al mismo tiempo (A. Ramírez, comunicación personal). Dos de estas líneas (VAX 3 y RBF 19-63) tuvieron rendimientos por encima de los 1500 kg ha⁻¹ en los tres tratamientos de fertilidad; hay que señalar que VAX 3 tuvo más de 1800 kg ha⁻¹ en los tres tratamientos de fertilidad. Las demás líneas, excepto Salagnac 90, tuvieron rendimientos entre 1000 y 1500 kg/ha. En los tres tratamientos de fertilidad la línea VAX 3 reveló ser de alto potencial con un rendimiento de 2012 kg ha⁻¹.

- b) Líneas con rendimientos iguales en los tratamientos de fertilidad completo y menos P con ambos superiores a menos N (completo = menos P > menos N)

Veinticinco de las 36 líneas evaluadas (69%) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los tratamientos de fertilidad completa y menos P, y a su vez tuvieron mayores rendimientos que el tratamiento de fertilidad menos N (Cuadro 10b). La gran mayoría de estas líneas (23) tuvieron rendimientos por encima de los 1500 kg ha⁻¹ en los tratamientos de fertilidad completo y menos P. Los rendimientos obtenidos en el tratamiento de fertilidad completo para las líneas Verano (2078 kg ha⁻¹) y Morales (1764 kg ha⁻¹) correspondieron a los reportados por Beaver et al. (2008) en donde obtuvieron 2241 kg ha⁻¹ para Verano y 1792 kg ha⁻¹ para Morales. En el tratamiento de fertilidad menos P un 41% (11 líneas) tuvieron un alto rendimiento con rendimientos mayores a los 2000 kg ha⁻¹ mientras que en el tratamiento de fertilidad menos N, solamente una tercera parte (9 líneas) tuvieron un rendimiento intermedio (rendimientos

entre 1000 y 1500 kg ha⁻¹). En los tratamientos de fertilidad completo y menos P las mejores líneas fueron PR0443-151, Amadeus 77 y PR0340-3-3-1, mientras que en el tratamiento de fertilidad menos N, la mejor línea fue PR0443-151 con un rendimiento de 1707 kg ha⁻¹. Resultados similares de rendimiento a lo obtenido por PR0443-151 en el tratamiento menos N, fueron reportados por Dos Santos y Fageria (2007) en Brasil, con la variedad 'Perola' que obtuvo rendimiento de 1890 kg ha⁻¹ bajo estrés de N y Crespo et al. (1987) en Puerto Rico, con la variedad 'Bonita' (1884 kg ha⁻¹). Kimani y Tongoon (2008) reportaron también rendimientos de 1709 kg ha⁻¹, 1729 kg ha⁻¹ y 1822 kg ha⁻¹ para las líneas 'AFR 708', 'CIM 9314-36' y 'CAL 143' respectivamente bajo condiciones de baja disponibilidad de N.

- c) Líneas con rendimiento diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden menos P > completo > menos N.

Dos de las 36 líneas (6%) tuvieron rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden menos P > completo > menos N (Cuadro 10c). En el tratamiento de fertilidad menos P estas dos líneas tuvieron rendimientos por encima de los 2000 kg ha⁻¹, en el tratamiento de fertilidad completo tuvieron rendimientos entre 1500 y 2000 kg ha⁻¹ mientras que en el tratamiento de fertilidad menos N tuvieron rendimientos alrededor de los 1000 kg ha⁻¹.

- d) Líneas con rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos P > menos N.

Tres de las 36 líneas (8%) tuvieron rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos P > menos N. Estas líneas tuvieron rendimiento por encima de 2000 kg/ha en el tratamiento de fertilidad completo, entre 1500 y 2000 kg/ha en el tratamiento de fertilidad menos P y menos de 1000 kg/ha en el tratamiento de fertilidad menos N (Cuadro 10d).

Bajo condiciones de baja disponibilidad de N y en término de eficiencia y de respuesta las líneas se dividieron en cuatro grupos.

a) Eficientes en la adquisición del N y respondedoras a su aplicación.

Ocho de las 36 líneas (22%) fueron eficientes en la adquisición del N (Cuadro 11a) y pertenecieron a la categoría de líneas con rendimientos iguales en los tratamientos de fertilidad completo y menos P y a su vez con rendimientos mayores a menos N (completo = menos P > menos N). Las ocho líneas fueron las mejores en cuanto a rendimiento en el tratamiento de fertilidad menos N. Estas ocho líneas tuvieron eficiencias de uso (EU) entre 36 y 55 con un valor promedio de 43, es decir por cada kg de $\text{NO}_3\text{-N}$ que hubo en el suelo previo a la siembra produjeron en promedio 43 kg de grano. Estas ocho líneas respondieron también a la aplicación del N (Cuadro 11a); tuvieron eficiencias agronómicas (EA) entre 15 y 25 con un valor promedio de 22 es decir por cada kg de N que se aplicó al suelo produjeron en promedio 22 kg de grano. Resultados similares de EA fueron reportados por Dos Santos y Fageria (2007) para la variedades de habichuela 'Grafite', 'Valente' y 'Jalo Precoce' respondedoras a N quienes produjeron respectivamente 18, 17 y 15 kg de grano por cada kg de N que se aplicó al suelo. La respuesta a la aplicación de N se reflejó también en el rendimiento relativo (RR) pues tuvieron RR promedio de 50% (Cuadro 11a). PR0443-151 resultó ser la única línea de este grupo con alto potencial de rendimiento (Figura 2b). Eso puede ser debido a que esta línea resultó ser respondedora a la inoculación, pues en otro experimento realizado en el mismo suelo y al mismo tiempo, PR0443-151 tuvo una nodulación de 4 correspondiente a un promedio de 40 nódulos/planta mientras que las otras líneas de este grupo tuvieron nodulación de 6 correspondiente a menos de 20 nódulos/planta (A. Ramírez, comunicación personal).

b) Eficientes en la adquisición del N y no respondedoras a su aplicación.

Cinco de las 36 líneas (14%) fueron eficientes en la adquisición de N (Cuadro 11b) y todas excepto Salagnac 90 pertenecieron al grupo de las líneas con rendimientos iguales en los tres tratamientos de fertilidad (completo = menos P = menos N). Estas cinco líneas tuvieron EU entre 37 y 62 con un valor promedio

de 47. Dos Santos y Fageria (2007) en un estudio hecho en Brasil, reportaron valores de EU de 62, 43 y de 51 para las líneas de habichuela 'Perola', 'Ponta' y 'Grafite', respectivamente las cuales serian eficientes bajo estrés de N. Estas líneas tuvieron una baja respuesta a la aplicación de N con una eficiencia agronómica de 3.4 (Cuadro 11b). Dos Santos y Fageria (2007) reportaron también valores bajas de respuesta (EA=3) a la aplicación de N para la variedad de habichuela Perola. Sobkowicz y Sniady (2004) reportaron también valores bajas de EA (7) con la aplicación de 50 kg ha⁻¹ de N para *Vicia faba* una leguminosa eficiente y no respondedora a la aplicación de N. Dos de estas líneas (VAX 3 y RBF 19-63) tuvieron alto potencial de rendimiento y las demás tuvieron potencial de rendimiento medio (Figura 2b).

c) Ineficientes en la adquisición del N y respondedoras a su aplicación.

La gran mayoría de las líneas, veinte de las 36 (56%) fueron ineficientes en la adquisición del N y respondieron a su aplicación (Cuadro 11c). Quince de estas veinte líneas fueron parte del grupo con rendimientos iguales en los tratamientos de fertilidad completo y menos P con ambos mayores a menos N (completo = menos P > menos N) y las cinco restantes fueron parte del grupo con rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad (completo > menos P > menos N y menos P > completo > menos N) . Estas veinte líneas tuvieron EU entre 20 y 35 con un valor promedio de 28. Resultados similares de EU fueron reportados por Dos Santos y Fageria, 2007 para las líneas de habichuela 'Radiante' y 'Jalo Precoce' con valores de EU de 15 y 17 respectivamente, bajo estrés de N. Todas estas veinte líneas respondieron a la aplicación de N con EA entre 16 y 46 con un valor promedio de 26. El bajo porcentaje de RR para este grupo de líneas (RR=37) explica también la respuesta de estas líneas a la aplicación del N y demuestra que sin la aplicación de N tienen bajo rendimiento.

d) Ineficientes en la adquisición del N y no respondedoras a su aplicación.

Dos de las 36 líneas (6%) fueron ineficientes en la adquisición del N y a su vez no respondieron a su aplicación (Cuadro 11d). Estas dos líneas fueron de bajo potencial de rendimiento.

Cuadro 11: Eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU) de N y rendimiento relativo (RR) de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, junio 2007.

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
a) Eficientes, respondedoras			
PR 0443-151	55.0	18.8	64.3
IBC 309-23	47.2	25.8	48.9
Verano	44.8	24.6	49.5
A774	44.2	21.5	53.1
MER 2212-28	40.8	15.2	40.8
IBC 308-15	40.5	33.7	37.6
MER 2226-28	38.3	18.7	52.4
RBF 11-36	36.2	16.9	57.7
Promedio	43.4	21.9	50.5
b) Eficientes, no respondedoras			
VAX 3	62.5	1.2	111.4
RBF 19-63	50.6	2.9	77.4
MEN 2201-64	42.5	4.1	108.7
RBF 11-33	42.0	-1.6	140.9
RBF 11-29	37.0	10.2	82.7
Promedio	46.9	3.4	104.2

Cuadro 11: continuación

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
c) Ineficientes, respondedoras			
Amadeus 77	35.0	46.0	21.7
PR 0333-27	34.0	12.4	57.5
ALS 9951-101-R1	32.8	25.2	41.7
XRAV 117-2	32.7	23.5	39.5
IBC 305-67	32.1	19.0	45.8
SER 16	31.2	43.6	33.2
MN 14059-7	31.0	21.5	42.0
Morales	29.5	18.5	51.3
RBF 15-17	29.2	22.9	42.2
BAT 477	28.9	27.9	30.6
PR 0340-3-3-1	27.6	31.0	29.6
MEN 2207-44	27.5	18.3	43.5
IBC 301-182	27.3	23.4	40.2
RBF 14-54	26.1	24.1	32.2
PR 0301-181	25.5	17.9	40.0
IBC 309-13	24.7	30.9	32.6
RBF 14-34	24.0	22.4	29.9
IBC 306-95	23.1	25.6	34.6
XRAV 96-11	22.6	35.8	23.0
XRAV 71-2	21.2	31.4	34.7
SEA 5	19.8	15.5	53.0
Promedio	27.6	26.2	37.1
d) Ineficientes, no respondedoras			
Salagnac 90	31.6	11.3	46.0
X02-33-147-3	24.1	11.1	58.7
Promedio	27.9	11.2	52.4
1: Eficiencia de uso >35: eficiente			
2: Eficiencia agronómica >12: respondedor			
3: Rendimiento relativo >60%: Alto			
eficiencia de uso <35: ineficiente			
eficiencia agronómica <12: no respondedor			
Rendimiento relativo <60%: Bajo			

Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, siete de las 36 líneas (19%) fueron eficientes en la adquisición del P y respondieron a su aplicación (Cuadro 12a). Cuatro de estas siete líneas fueron parte de la categoría de líneas con rendimientos completo = menos P = menos N y las tres restantes del grupo con rendimientos diferentes en los tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos N > menos P. Estas siete líneas tuvieron EU entre 44 y 60 con un valor

promedio de 50. Estas siete líneas respondieron también a la aplicación del P con un valor promedio de EA de 16 (Cuadro 12a). Todas estas siete líneas tuvieron alto potencial de rendimiento sin la aplicación de P.

La gran mayoría de las líneas, 27 de las 36 (75%) fueron eficientes en la adquisición del P y a su vez no respondieron a su aplicación (Cuadro 12b). Estas 27 líneas tuvieron un valor promedio de EU de 53 y de EA de 3 respectivamente. El alto valor promedio de rendimiento relativo (95) explica también la no respuesta de estas líneas a la aplicación del P. Ocho de estas líneas tuvieron rendimientos por encima de los 2000 kg ha⁻¹ (Figura 3b).

Cuadro 12: Eficiencia agronómica (EA), eficiencia de uso (EU) y rendimiento relativa (RR) de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, junio 2007.

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
a) Eficientes, respondedoras			
Amadeus 77	59.8	16.7	64.1
SER 16	55.7	23.2	69.4
IBC 308-15	51.6	13.3	74.3
XRAV 96-11	47.8	13.0	73.4
XRAV 71-2	46.1	14.4	72.4
MER 2212-28	45.9	13.4	63.8
IBC 309-13	43.7	16.2	69.3
Promedio	50.1	15.7	69.5

Cuadro 12: continuación

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
b) Eficientes, no respondedoras			
Morales	83.6	6.4	79.4
PR 0443-151	79.3	-1.0	105.4
PR 0340-3-3-1	69.7	-2.0	105.3
Verano	68.6	-0.2	105.5
MEN 2207-44	63.7	-8.4	124.1
A774	63.1	-2.1	103.9
RBF 11-29	61.6	5.5	79.0
RBF 11-36	59.9	-2.9	106.4
VAX 3	58.5	-2.0	112.5
IBC 306-95	57.3	0.8	98.9
IBC 309-23	56.5	8.0	80.4
IBC 305-67	53.0	-1.6	106.4
MEN 2201-64	52.1	-0.7	106.5
ALS 9951-101-R1	50.3	7.7	90.4
RBF 19-63	49.0	-0.9	111.2
MN 14059-7	48.9	3.6	89.9
X02-33-147-3	46.6	3.0	95.2
RBF 14-34	45.9	7.3	89.2
MER 2226-28	45.8	7.2	89.1
BAT 477	45.3	3.3	93.0
IBC 301-182	44.9	8.9	73.0
RBF 15-17	43.2	7.5	74.6
Salagnac 90	39.3	0.4	99.1
XRAV 117-2	38.9	8.9	81.0
PR 0333-27	38.1	10.1	66.3
RBF 11-33	37.4	-3.8	142.5
RBF 14-54	36.7	6.5	77.9
Promedio	52.6	2.8	95.4
c) Ineficientes, respondedoras			
PR 0301-181	29.2	13.1	55.5
d) Ineficientes, no respondedoras			
SEA 5	26.7	2.2	107.3
1: Eficiencia de uso >35: eficiente			
2: Eficiencia agronómica >12: respondedor			
3: Rendimiento relativo >60%: Alto			
eficiencia de uso <35: ineficiente			
eficiencia agronómica <12: no respondedor			
Rendimiento relativo <60%: Bajo			

En las figuras 2 y 3 se presentan un resumen de las características de cada línea en cuanto a eficiencia de uso (EU), respuesta agronómica (EA) y

potencial de rendimiento bajo estrés de N (Figura 2) y de P (Figura 3). De manera general, en esta siembra se observó:

- Un 78% de las líneas respondieron a la aplicación de N (Figura 2A, cuadrante II y IV), lo que parece indicar que de manera general las líneas de habichuela no tuvieron respuesta a la inoculación. Resultados similares fueron obtenidos en otros lugares de Puerto Rico en donde la habichuela (variedad 'Bonita' en Juana Díaz y 'Arroyo Loro' en Lajas) no respondió a la inoculación (Crespo et al, 1987; Velazquez et al, 1988).

- Solamente un 36% de las líneas fueron eficientes en la adquisición del N (Figura 2A, cuadrante I y II) de las cuales tres (VAX 3, RBF 19-63, PR 0443-151) tuvieron alto potencial de rendimiento (Figura 2B, cuadrante I y II).

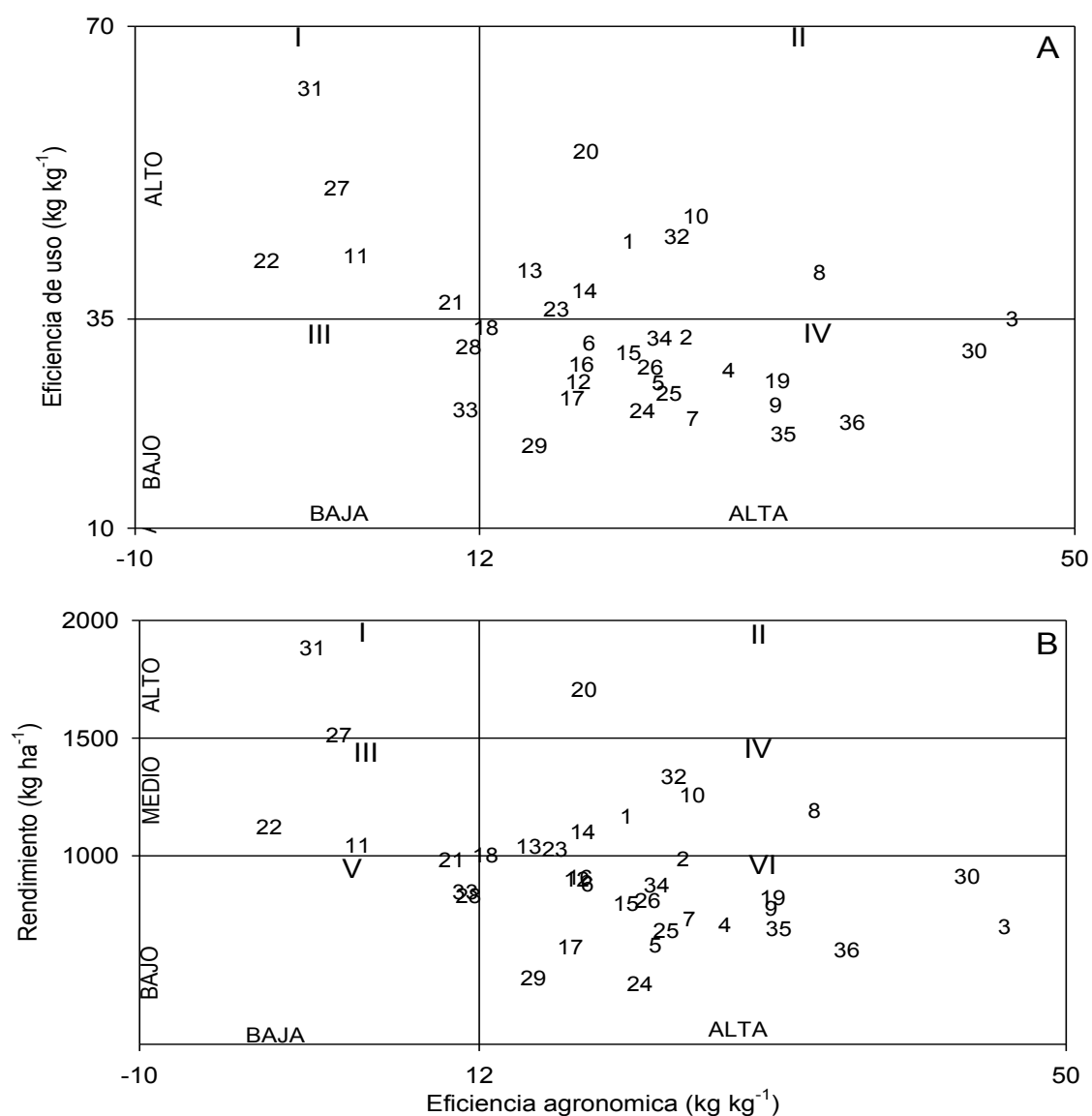
- 97% de las líneas mostraron eficiencia en la adquisición del P (Figura 3A, cuadrante I y II) de las cuales 12 líneas tuvieron rendimiento por encima de los 2000 kg ha⁻¹ (Figura 3B, cuadrante I y II).

- Dos líneas (MER 2212-28 y IBC 308-15) fueron eficientes en la adquisición de N y de P y a su vez respondieron a la aplicación de las mismas.

- Cinco líneas (VAX 3, RBF 19-63, MEN 2201-64, RBF 11-33, RBF 11-29) fueron eficientes en la adquisición de N y de P, pero no respondieron a la aplicación de las mismas.

- Las líneas eficientes y respondedoras a la aplicación de N y/o de P pueden usarse en suelos de alto contenido de N y/o de P o cuando hay disponibilidad de fertilizantes nitrogenados y/o fosfatados.

- Las líneas eficientes y no respondedoras a la aplicación de N y/o de P pueden usarse cuando no hay disponibilidad de fertilizantes nitrogenados y/o fosfatados.



Clave

1	A774	10	IBC 309-23	19	PR0340-3-3-1	28	Salagnac 90A
2	ALS 9951	11	MEN 2201-64	20	PR0443-151	29	SEA5
3	Amadeus 77	12	MEN 2207-44	21	RBF 11-29	30	SER 16
4	BAT 477	13	MER 2212-28	22	RBF 11-33	31	VAX 3
5	IBC 301-182	14	MER2226-28	23	RBF 11-36	32	Verano
6	IBC 305-67	15	MN 14059-7	24	RBF 14-34	33	X02-33-147-3
7	IBC 306-95	16	MORALES	25	RBF 14-54	34	XRAV 117-2
8	IBC 308-15	17	PR0301-181	26	RBF 15-17	35	XRAV 71-2
9	IBC 309-13	18	PR0333-27	27	RBF 19-63	36	XRAV 96-11

Figura 2: Características de cada línea en cuanto a eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento bajo estrés de N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

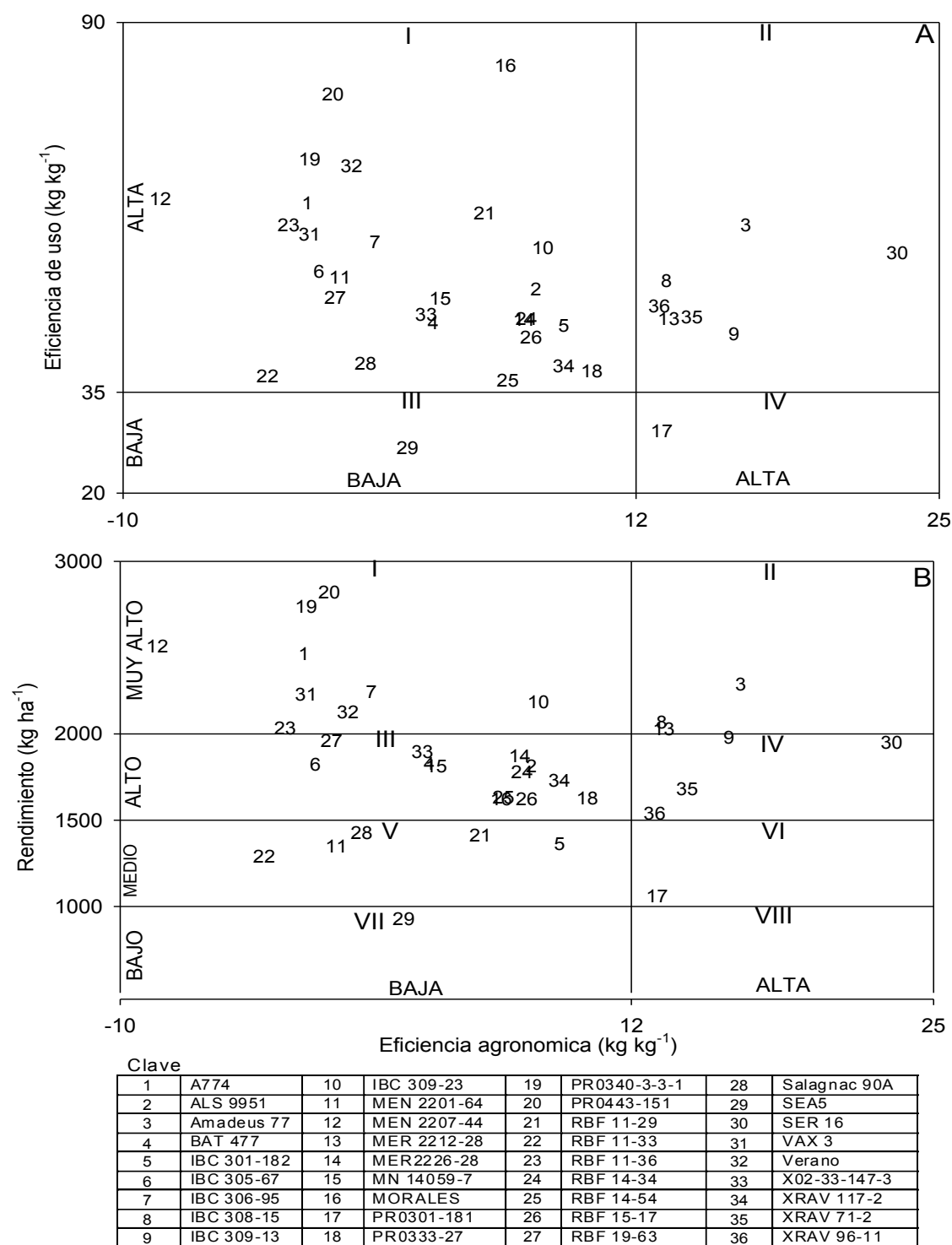


Figura 3: Características de cada línea en cuanto a eficiencia, respuesta y rendimiento bajo estrés de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

5.2.1.2 Ensayo 2: enero 2008

Al igual que en junio 2007, hubo efecto de la interacción línea x fertilidad ($p < 0.05$), lo que significa que el comportamiento de las líneas está influenciado por el régimen de fertilidad, y que existe una alta variabilidad genotípica en cuanto a respuesta a fertilizantes nitrogenados y fosfatados (Cuadro 13).

Cuadro 13: Análisis de varianza para el rendimiento en grano en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 08.

Fuente de Variación	GL	GL error	F-valor	p-valor
Fertilidad	2	8	7.88	0.0128
Línea	35	330	16.29	0.0001
Línea x Fertilidad	70	330	1.81	0.0003
CV (%)	-----27.6-----			

GL = Grado de Libertad CV = Coeficiente de variación

Cuadro 14: Rendimiento en grano por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.

Líneas	Completo	Menos P kg ha ⁻¹	Menos N
a) Líneas con rendimientos donde completo = menos P = menos N			
PR0340-3-3-1	2300 a	2443 a	2065 a
VAX 3	1467 a	1894 a	1479 a
A774	1359 a	1279 a	1343 a
RBF 11-29	1384 a	1449 a	1150 a
RBF 11-33	1291 a	1056 a	1100 a
XRAV 117-2	1095 a	843 a	948 a
RBF 15-17	1125 a	1037 a	818 a
IBC 309-13	1002 a	1065 a	729 a
b) Líneas con rendimientos donde completo = menos N > menos P			
X02-33-147-3	1185 a	563 b	995 a
Morales	953 a	651 b	937 a
Amadeus 77	795 a	330 b	611 a

Cuadro 14: continuación

Líneas	Completo	Menos P kg ha ⁻¹	Menos N
c) Líneas con rendimientos donde completo > menos P = menos N			
PR0443-151	1918 a	1434 b	1461 b
ALS 9951-101-R1	1414 a	743 b	708 b
RBF 14-34	1322 a	438 b	638 b
IBC 308-15	1306 a	773 b	780 b
RBF 11-36	1295 a	740 b	741 b
RBF 19-63	1268 a	841 b	1074 b
BAT 477	1259 a	600 b	728 b
MER2226-28	1192 a	740 b	805 b
IBC 305-67	1184 a	886 b	784 b
MN 14059-7	1107 a	631 b	693 b
MER 2212-28	1085 a	642 b	714 b
XRAV 71-2	1073 a	642 b	671 b
SEA 5	1042 a	429 b	452 b
SER 16	1040 a	432 b	497 b
PR 0333-27	1029 a	485 b	458 b
XRAV 96-11	1007 a	547 b	679 b
Salagnac 90A	970 a	593 b	484 b
IBC 306-95	930 a	368 b	515 b
RBF 14-54	904 a	667 b	580 b
MEN 2201-64	825 a	559 b	451 b
Verano	724 a	395 b	577 b
d) Líneas con rendimientos donde completo > menos N > menos P			
IBC 309-23	1460 a	616 c	950 b
MEN 2207-44	1393 a	515 c	935 b
IBC 301-182	1294 a	531 c	872 b
PR 0301-181	1179 a	358 c	697 b
Rendimiento promedio	1199	784	837
DMS Tukey.05	509	509	509

Letras iguales dentro de una misma fila indican no diferencia al 0.05
 El DMS sirve para comparar entre columnas

De acuerdo al comportamiento de las líneas en los tres tratamientos de fertilidad se pudo dividir las en cuatro categorías:

- a) Líneas con rendimientos iguales en los tres tratamientos de fertilidad (completo = menos P = menos N).

Ocho de las 36 líneas evaluadas (22%) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los tres tratamientos de fertilidad (Cuadro 14a). Dos de estas líneas (PR0340-3-3-1 y VAX-3) tuvieron rendimientos por encima de los 1400 kg ha⁻¹ en los tres tratamientos de fertilidad, y PR0340-3-31 tuvo más de 2000 kg ha⁻¹ en los tres tratamientos de fertilidad. Las demás líneas tuvieron rendimientos entre 900 y 1500 kg ha⁻¹ en los tres tratamientos de fertilidad. En los tres tratamientos de fertilidad las dos mejores líneas fueron VAX 3 y PR0340-3-3-1.

- b) Líneas con rendimientos iguales en los tratamientos de fertilidad completo y menos N con ambos mayores a menos P (completo = menos N > menos P).

Tres de las 36 líneas evaluadas (8%) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los tratamientos de fertilidad completo y menos N, pero ambos fueron diferentes y mayores que el tratamiento menos P (Cuadro 14b). Estas tres líneas tuvieron rendimientos entre 650 y 1200 kg ha⁻¹ en los regímenes de fertilidad completa y menos N y rendimientos por debajo de los 650 kg ha⁻¹ en menos P. Por lo general, son líneas de bajo potencial de rendimiento.

- c) Líneas con rendimiento iguales en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P con ambos menores al tratamiento completo (completo > menos P = menos N).

Veintiuno de las 36 líneas (58%) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P, y a su vez tuvieron menores rendimientos que en el tratamiento completo (Cuadro 14c). La gran mayoría de estas líneas (16) tuvieron rendimientos por encima de los 1000 kg/ha en el tratamiento de fertilidad completo. Todos, excepto PR0443-151 tuvieron rendimientos por debajo de los 1000 kg ha⁻¹ bajo condiciones de estrés (menos N y menos P). PR 0443-151 tuvo rendimientos por encima de los 1400 kg ha⁻¹

en los tres tratamientos de fertilidad. En los tres tratamientos de fertilidad la mejor línea fue PR 0443-151.

- d) Líneas con rendimiento diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos N > menos P.

Cuatro líneas (11%) tuvieron rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos N > menos P (Cuadro 14d). Estas cuatro líneas tuvieron rendimientos por encima de los 1000 kg ha⁻¹ en el tratamiento de fertilidad completo. En el tratamiento de fertilidad menos N tuvieron rendimientos entre 700 y 950 kg ha⁻¹ y en el tratamiento de fertilidad menos P tuvieron rendimientos por debajo de los 600 kg ha⁻¹.

Bajo condiciones de baja disponibilidad de N, en término de eficiencia y de respuesta, las 36 líneas de este ensayo tuvieron cuatro comportamientos. Seis de las 36 líneas evaluadas (17%) fueron eficientes en la adquisición de N y a su vez respondieron a su aplicación (Cuadro 15a). Este grupo de líneas fue constituido por las cuatro líneas de la categoría con rendimientos diferentes en los tres tratamientos de fertilidad en el orden completo > menos N > menos P (Cuadro 14d) y las dos mejores líneas de la categoría con rendimientos completo > menos N = menos P (Cuadro 14c). Estas seis líneas tuvieron EU entre 35 y 72 con un valor promedio de 43 (Cuadro 15a). Estas líneas respondieron también a la aplicación del N con EA entre 12 y 16 con un valor promedio de 14. Una de estas líneas (PR 0443-151) tuvo alto potencial de rendimiento en el tratamiento de fertilidad menos N (Figura 4B).

Once de las 36 líneas (30%) fueron eficientes en la adquisición del N pero no respondieron a su aplicación (Cuadro 15b). Las ocho líneas de la categoría con rendimientos completo = menos N = menos P (Cuadro 14a) y las tres líneas de la categoría con rendimientos completo = menos N > menos P (Cuadro 14b) constituyeron este grupo de líneas. Estas once líneas tuvieron EU entre 35 y 90 con un valor promedio de 52 (Cuadro 15b), no respondieron a la aplicación del N pues tuvieron EA entre 0 y 9 con un valor promedio de 5. El alto valor promedio del RR (89%) explica la ausencia de respuesta a la aplicación del N (Cuadro

15b). Dos de estas líneas (PR 0340-3-3-1 y VAX 3) tuvieron alto potencial de rendimiento mientras que otras cuatro (A774, RBF 11-29, RBF 11-33, RBF 19-63) tuvieron potencial medio de rendimiento bajo estrés de N (Figura 4B).

Trece de las 36 líneas (36%) fueron ineficientes en la adquisición del N y a su vez respondieron a su aplicación (Cuadro 15c). Todas estas líneas pertenecieron a la categoría con rendimientos completo > menos N = menos P (Cuadro 14c). Estas trece líneas tuvieron EU entre 19 y 33 con un valor promedio de 25 (Cuadro 15c), respondieron a la aplicación del N con EA entre 14 y 24 con un valor promedio de 18. El valor promedio bajo de RR (53%) de estas líneas explica esta respuesta a la aplicación del N. Todas estas líneas tuvieron bajo potencial de rendimiento bajo condiciones de baja disponibilidad de N (Figura 4B).

Seis de las 36 líneas (17%) fueron ineficientes y no respondieron a la aplicación del N (Cuadro 15d). Este grupo fueron parte del grupo de las líneas en la categoría con rendimientos completo > menos P = menos N (Cuadro 14d) con los menores rendimientos en el tratamiento de fertilidad menos N. Estas seis líneas tuvieron valores promedios de EU y de EA de 22 y 7 respectivamente. Son líneas de bajo potencial de rendimiento tanto en el tratamiento de fertilidad completo como en el tratamiento menos N.

Cuadro 15: Eficiencia agronómica, rendimiento relativo y eficiencia de uso de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
a) Eficientes, respondedoras			
PR 0443-151	72.3	15.9	77.3
IBC 309-23	44.5	13.7	66.0
MER 2226-28	37.3	12.0	67.5
IBC 308-15	35.2	16.5	60.4
MEN 2207-44	35.0	13.0	69.0
IBC 301-182	34.2	12.6	70.0
Promedio	43.1	14.0	68.4

Cuadro 15: continuación

Líneas	Eficiencia de uso ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia agronómica ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento relativo ³ (%)
b) Eficientes, no respondedoras			
PR 0340-3-3-1	89.8	7.6	89.1
VAX 3	66.1	0.5	100.0
A774	60.6	0.5	98.8
RBF 19-63	57.8	3.5	85.0
RBF 11-29	49.7	5.0	93.1
X02-33-147-3	49.3	5.2	91.2
XRAV 117-2	45.9	5.0	82.7
RBF 11-33	40.5	8.8	82.1
IBC 309-13	37.1	6.0	92.0
Morales	37.0	0.5	98.3
RBF 15-17	35.0	9.0	68.6
Promedio	51.7	4.7	89.2
c) Ineficientes, respondedoras			
ALS 9951-101-R1	32.6	24.8	57.3
MN 14059-7	31.5	13.6	63.0
RBF 11-36	30.9	15.0	57.0
BAT 477	25.1	19.7	53.9
PR 0301-181	24.7	15.9	60.0
XRAV 71-2	24.3	17.7	55.4
Salagnac 90	24.0	15.2	50.0
RBF 14-34	23.8	24.2	42.0
SER 16	23.7	15.5	48.0
IBC 305-67	23.0	14.8	54.1
PR 0333-27	22.3	18.6	47.3
MER 2212-28	21.3	19.3	38.9
SEA 5	18.6	16.9	62.3
Promedio	25.1	17.8	53.0
d) Ineficientes, no respondedoras			
XRAV 96-11	30.8	8.2	67.0
RBF 14-54	26.1	6.3	74.0
Amadeus 77	24.3	3.5	91.2
IBC 306-95	19.7	10.8	68.9
Verano	17.1	4.2	80.0
MEN 2201-64	11.6	10.0	50.8
Promedio	21.6	7.2	72.0

1: Eficiencia de uso >35: eficiente

2: Eficiencia agronómica >12: respondedor

3: Rendimiento relativo >60%: Alto

eficiencia de uso <35: ineficiente

eficiencia agronómica <12: no respondedor

Rendimiento relativo <60%: Bajo

Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, una línea (PR 0443-151) fue eficiente y respondedora a la aplicación del P. Esta línea tuvo una EU de 38, una EA de 14 y un RR de 75% (Cuadro 16a). PR0443-151 fue una línea de alto potencial de rendimiento bajo condiciones de baja disponibilidad de P.

Siete de las 36 líneas (19%) mostraron eficiencia en la adquisición del P y no respondieron a su aplicación. Estas siete líneas fueron parte de la categoría de líneas con rendimientos completo = menos P = menos N (Cuadro 14a). Estas siete líneas tuvieron EU entre 35 y 70 con un valor promedio de 48 (Cuadro 16b). Ninguna de estas líneas respondió a la aplicación del P con EA entre -12 y 7. Tres de estas líneas (PR 0340-3-3-1, VAX 3 y RBF 11-29) tuvieron alto potencial de rendimiento bajo estrés de P (Figura 5B).

La gran mayoría de las líneas, 23 de 36 (64%) fueron ineficientes pero respondieron a la aplicación del P (Cuadro 16c). Este grupo fue constituido por las tres líneas de la categoría con rendimientos completo = menos N > menos P (Cuadro 14b), las cuatro líneas de la categoría con rendimientos completo > menos N > menos P (Cuadro 14d) y 16 líneas de la categoría con rendimientos completo > menos N = menos P (Cuadro 14c). Estas 23 líneas tuvieron valores promedio de EU y de EA de 21 y 19 respectivamente (Cuadro 16c). El valor bajo del RR (49%) explica la respuesta de este grupo de líneas a la aplicación del P.

Cinco de las 36 líneas (14%) fueron ineficientes y no respondieron a la aplicación del P (Cuadro 16d).

Cuadro 16: Eficiencia agronómica, rendimiento relativo y eficiencia de uso de las líneas en el tratamiento de fertilidad menos P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.

Líneas	Eficiencia de uso ¹ kg kg ⁻¹	Eficiencia agronómica ² kg kg ⁻¹	Rendimiento relativo ³ %
a) Eficientes, respondedoras			
PR 0443-151	37.6	13.8	75.0
b) Eficientes, no respondedoras			
PR 0340-3-3-1	70.5	-4.1	106.2
VAX 3	58.1	-12.6	134.8
RBF 11-29	52.3	-1.9	104.7
IBC 309-13	44.6	-1.8	106.3
A774	40.9	2.3	94.1
RBF 11-33	37.2	7.0	81.0
RBF 15-17	35.4	2.5	92.2
Promedio	48.4	-1.2	102.8
c) Ineficientes, respondedoras			
IBC 305-67	32.4	13.0	59.7
RBF 11-36	29.4	17.1	57.0
RBF 19-63	28.5	12.2	66.0
MER 2226-28	27.7	17.0	56.6
IBC 308-15	26.8	14.0	65.2
ALS 9951-101-R1	25.8	19.9	55.0
XRAV 71-2	25.0	22.5	36.8
MER 2212-28	23.7	18.1	42.4
Morales	23.6	14.9	68.3
BAT 477	22.5	23.4	43.1
IBC 309-23	22.5	28.3	43.0
Salagnac 90	21.7	12.0	58.0
X02-33-147-3	20.2	21.7	50.5
MN 14059-7	20.0	18.6	56.0
RBF 14-34	17.0	25.3	34.4
PR 0333-27	16.7	16.5	56.2
SEA 5	16.2	22.4	43.1
SER 16	15.9	17.4	42.0
MEN 2207-44	15.9	27.8	35.4
IBC 301-182	15.8	21.7	48.7
IBC 306-95	13.6	17.8	37.1
PR 0301-181	12.8	27.6	30.0
Amadeus 77	12.4	13.3	41.5
Promedio	21.1	19.2	49.0

Cuadro 16: continuación

Líneas	Eficiencia de uso ¹ kg kg ⁻¹	Eficiencia agronómica ² kg kg ⁻¹	Rendimiento relativo ³ %
d) Ineficientes, no respondedoras			
XRAV 117-2	29.0	5.0	75.6
RBF 14-54	24.4	9.1	64.0
MEN 2201-64	22.5	6.9	70.5
XRAV 96-11	19.7	11.1	54.0
Verano	18.6	7.1	41.0
Promedio	22.8	7.8	61.0

1: Eficiencia de uso >35: eficiente

eficiencia de uso <35: ineficiente

2: Eficiencia agronómica >12: respondedor

eficiencia agronómica <12: no respondedor

3: Rendimiento relativo >60%: Alto

Rendimiento relativo <60%: Bajo

En las figuras 4 y 5 se presentan un resumen de las características de cada línea en cuanto a eficiencia de uso (EU), respuesta agronómica (EA) y potencial de rendimiento tanto bajo estrés de N (Figura 4) como de P (Figura 5). De manera general, en esta siembra se observó que:

- Un 53% de las líneas respondieron a la aplicación del N (Figura 4A, cuadrante II y IV) de las cuales una (PR 0443-151) tuvo alto rendimiento en el tratamiento de fertilidad menos N (Figura 4B, cuadrante II).

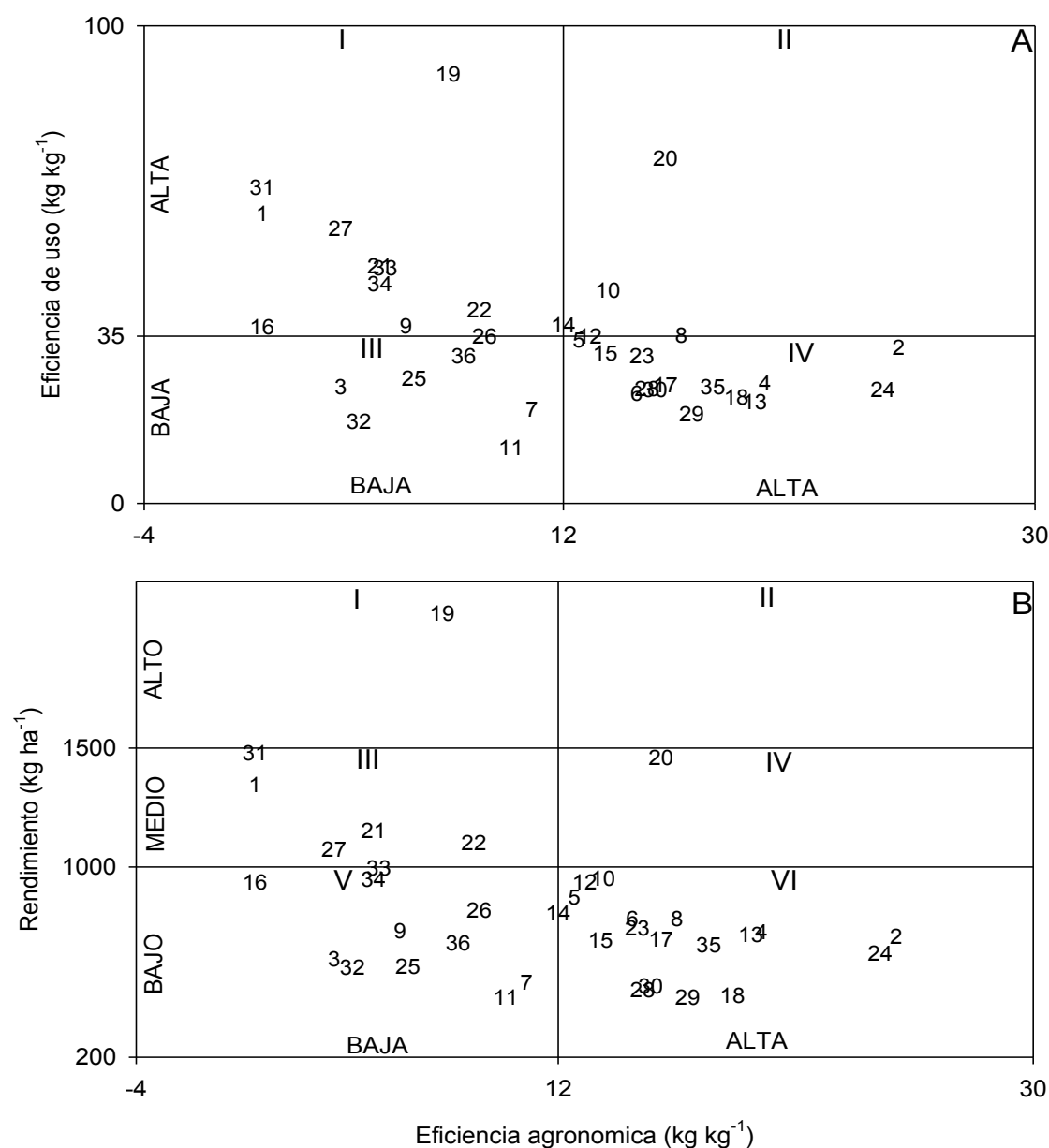
- Un 47% de las líneas fueron eficientes en la adquisición del N (Figura 4A, cuadrante I y II) de las cuales tres líneas (PR 0340-3-3-1, VAX 3, PR 0443-151) tuvieron alto potencial de rendimiento (Figura 4B, cuadrante I y II) y otras tres (RBF 19-63, RBF 11-29, RBF 11-33) tuvieron rendimientos medios (Figura 4B, cuadrante III).

- El 67% de las líneas respondieron a la aplicación del P (Figura 5A, cuadrante II y IV) de las cuales la línea PR 0443-151 tuvo alto potencial de rendimiento (Figura 5B, cuadrante II).

- El 22% de las líneas fueron eficientes en la adquisición del P (Figura 5A, cuadrante I y II) de las cuales las líneas PR 0340-3-3-1, VAX 3, RBF 11-29, PR 0443-151 tuvieron altos rendimientos bajo condiciones de baja disponibilidad de P (Figura 5B, cuadrante I y II).

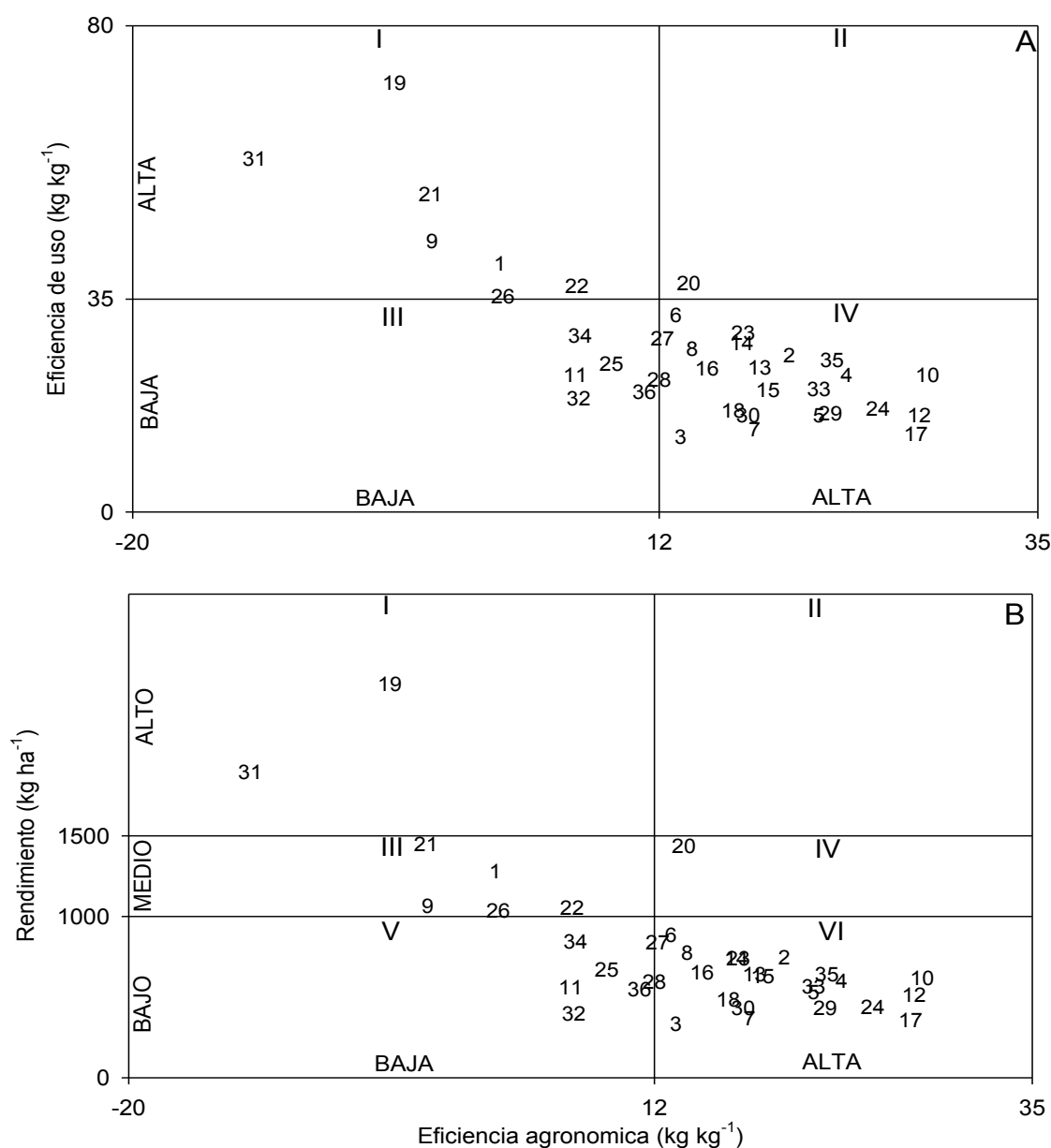
- La línea PR 0443-151 fue eficiente en la adquisición de N y de P y respondió también a la aplicación de las mismas.

- Seis líneas: PR 0340-3-3-1, VAX 3, A774, RBF 11-29, RBF 11-33, IBC 309-13 fueron eficientes en la adquisición de N y de P, pero no respondieron a la aplicación de las mismas.



Clave							
1	A774	10	IBC 309-23	19	PR0340-3-3-1	28	Salagnac 90A
2	ALS 9951	11	MEN 2201-64	20	PR0443-151	29	SEA5
3	Amadeus 77	12	MEN 2207-44	21	RBF 11-29	30	SER 16
4	BAT 477	13	MER 2212-28	22	RBF 11-33	31	VAX 3
5	IBC 301-182	14	MER2226-28	23	RBF 11-36	32	Verano
6	IBC 305-67	15	MN 14059-7	24	RBF 14-34	33	X02-33-147-3
7	IBC 306-95	16	MORALES	25	RBF 14-54	34	XRAV 117-2
8	IBC 308-15	17	PR0301-181	26	RBF 15-17	35	XRAV 71-2
9	IBC 309-13	18	PR0333-27	27	RBF 19-63	36	XRAV 96-11

Figura 4: Características de cada línea en cuanto a eficiencia de uso, respuesta agronómica y rendimiento bajo estrés de N en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.



Clave							
1	A774	10	IBC 309-23	19	PR0340-3-3-1	28	Salagnac 90A
2	ALS 9951	11	MEN 2201-64	20	PR0443-151	29	SEA5
3	Amadeus 77	12	MEN 2207-44	21	RBF 11-29	30	SER 16
4	BAT 477	13	MER 2212-28	22	RBF 11-33	31	VAX 3
5	IBC 301-182	14	MER2226-28	23	RBF 11-36	32	Verano
6	IBC 305-67	15	MN 14059-7	24	RBF 14-34	33	X02-33-147-3
7	IBC 306-95	16	MORALES	25	RBF 14-54	34	XRAV 117-2
8	IBC 308-15	17	PR0301-181	26	RBF 15-17	35	XRAV 71-2
9	IBC 309-13	18	PR0333-27	27	RBF 19-63	36	XRAV 96-11

Figura 5: Características de cada línea en cuanto a eficiencia, respuesta y rendimiento bajo estrés de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.

5.2.2 Adaptabilidad

La adaptabilidad de todas las líneas estudiadas bajo los tres tratamientos de fertilidad (completo, menos N y menos P) y en las tres épocas (febrero 2007, junio 2007 y enero 2008) se describe en el Cuadro 17. El porcentaje de adaptabilidad permite seleccionar las mejores líneas bajo todas las condiciones evaluadas. Se identificaron cinco líneas de buena adaptabilidad a todas las condiciones, de las cuales tres (VAX 3, PR0340-3-3-1 y A774) tuvieron un porcentaje de adaptabilidad de 100%; es decir los rendimientos de estas líneas fueron superiores al rendimiento promedio general de las 36 líneas en todos los ensayos realizados.

VAX 3 fue una línea eficiente y no respondedora bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P tanto en junio 2007 (Cuadro 11b y 12b) como en enero 2008 (Cuadro 15b y 16b). Para todas las siembras combinadas, VAX 3 tuvo rendimientos promedios de 2002 kg ha⁻¹, 2061 kg ha⁻¹ y 1680 kg ha⁻¹ en los tratamientos de fertilidad completo, menos P y menos N respectivamente. Esta línea se puede establecer en suelos de baja disponibilidad de N y de P con inoculación, sin la necesidad de fertilizantes nitrogenados y fosfatados y donde se espera buenos rendimientos.

PR 0340-3-3-1 fue una línea eficiente y no respondedora bajo condiciones de baja disponibilidad de P tanto en junio 2007 (Cuadro 12b) como en enero 2008 (Cuadro 16b). Bajo condiciones de baja disponibilidad de N esta línea fue eficiente y no respondedora en enero 2008 (Cuadro 16b) mientras que en junio 2007 fue ineficiente y respondedora (Cuadro 11c). Para todas las siembras combinadas, PR 0340-3-3-1 tuvo rendimientos promedios de 2355 kg ha⁻¹, 2590 kg ha⁻¹ y 1443 kg ha⁻¹ en los tratamientos de fertilidad completo, menos P y menos N respectivamente. PR 0340-3-3-1 puede establecer en suelos de baja disponibilidad de P, sin la necesidad de fertilizar con P y donde se espera buenos rendimientos.

A774 fue una línea eficiente en la adquisición de N y de P tanto en junio 2007 (Cuadro 11a y 12b) como en enero 2008 (Cuadro 15b y 16b) y no respondió a la aplicación del P tanto en junio 2007 (Cuadro 12b) como en enero

2008 (Cuadro 16b). En junio 2007 respondió a la aplicación del N (Cuadro 11a) mientras que en enero 2008 no respondió al N (Cuadro 15b). Para todas las siembras combinadas, A774 tuvo rendimientos promedios de 1891 kg ha⁻¹, 1872 kg ha⁻¹ y 1255 kg ha⁻¹ en los tratamientos de fertilidad completo, menos P y menos N respectivamente. A774 puede establecer en suelos de baja disponibilidad de P, sin la necesidad de fertilizar con P y donde se espera buenos rendimientos.

Dos líneas (PR0443-151, IBC 309-23) tuvieron un porcentaje de adaptabilidad de 86%. Los rendimientos de estas líneas fueron superiores al rendimiento promedio general de las 36 líneas en seis de los siete ambientes evaluados. PR 0443-151 fue una línea eficiente en la adquisición de N y de P tanto en junio 2007 (Cuadro 11a y 12b) como en enero 2008 (Cuadro 15a y 16a), respondió a la aplicación del N tanto en junio 2007 (Cuadro 11a) como en enero 2008 (Cuadro 15a). En junio 2007 no respondió a la aplicación del P (Cuadro 12b) mientras que respondió al P en enero 2008 (Cuadro 12b). Para todas las siembras combinadas, PR 0443-151 tuvo rendimientos promedios de 2070 kg ha⁻¹, 2128 kg ha⁻¹ y 1584 kg ha⁻¹ en los tratamientos de fertilidad completo, menos P y menos N respectivamente. La línea IBC 309-23 tuvo igual comportamiento que PR 0443-151 en cuanto a eficiencia y respuesta bajo estrés de N y de P. Estas dos líneas pueden establecerse en suelos de alto contenido de N o donde hay disponibilidad de fertilizantes nitrogenados.

Cuadro 17: Adaptabilidad de las líneas en los dos ensayos del experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007 y enero 2008.

Líneas	N _i	M	Ad _i (%)
A774	7	7	100
PR0340-3-3-1	7	7	100
VAX 3	7	7	100
IBC 309-23	6	7	86
PR-0443-151	6	7	86
IBC 308-15	5	7	71
RBF 11-33	5	7	71
RBF 19-63	5	7	71
RBF-11-29	5	7	71
ALS 9951-101-R1	4	7	57
IBC-309-13	4	7	57
MEN 2207-44	4	7	57
MER 2226-28	4	7	57
RBF 11-36	4	7	57
XRAV-117-2	4	7	57
Amadeus 77	3	7	43
IBC 306-95	3	7	43
IBC-301-182	3	7	43
IBC-305-67	3	7	43
MER 2212-28	3	7	43
Verano	3	7	43
SER 16	3	7	43
X02-33-147-3	3	7	43
MN 14059-7	2	7	29
Morales	2	7	29
RBF 15-17	2	7	29
BAT 477	1	7	14
MEN 2201-64	1	7	14
PR-0333-27	1	7	14
RBF 14-34	1	7	14
RBF 14-54	1	7	14
Salagnac 90A	1	7	14
XRAV-71-2	1	7	14
XRAV-96-11	1	7	14
PR-0301-181	0	7	0
SEA 5	0	7	0

N_i = numero de ambientes en donde el rendimiento del genotipo fue mayor al rendimiento del ambiente.

M = numero de ambientes

Ad_i = % de adaptabilidad del genotipo = (N_i * 100)/m según St-Pierre et al, 1967

5.2.3. Peso específico de 100 semillas (junio 2007)

Se encontró diferencia significativa entre el peso específico de 100 semillas solamente para el efecto línea ($p < 0.01$) y color ($p\text{-valor} < 0.01$) (Cuadro 18). La carencia de interacción entre fertilidad y línea/color indicó que la fertilidad no influyó en el peso de la semilla y que la misma depende únicamente del genotipo. Tampoco hubo efecto principal de fertilidad en los dos casos.

Cuadro 18: Análisis de varianza para el peso específico de semilla en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 07.

Fuentes de variación	Línea		Color	
	F-valor	p-valor	F-valor	p-valor
Fertilidad	2.21	0.23	0.33	0.74
Línea/color	26.53	< 0.0001	43.19	< 0.0001
Línea/color * Fertilidad	0.93	0.62	0.43	0.86

Todas las líneas tuvieron semillas pequeñas (peso específico < 30 g) (Cuadro 19). El peso específico obtenido para Verano (20.5 g) fue similar a lo reportado por Beaver et al, 2008 para esta línea (22 g). Singh et al, 2001a reportaron valores de peso específico de 25 g para VAX 3.

Por lo general, las líneas con grano de color rojo y crema tuvieron valores de peso específico mas altos con un promedio general de 23.0 g y 22.3 g respectivamente, las líneas con grano de color negro tuvieron peso específico intermedio y las de menor peso específico fueron las de grano blanco provenientes de Puerto Rico con peso específico por debajo de los 20 g y con un promedio general de 17.5 g (Cuadro 20).

Cuadro 19: Peso específico de semilla de las líneas del experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.

Línea	Peso específico (g/100 semillas)	Clasificación	Color
VAX 3	26.7	Pequeña	Rojo
RBF 11-29	25.6	Pequeña	Rojo
A774	25.0	Pequeña	Crema
Amadeus 77	25.0	Pequeña	Rojo
MN 14059-7	24.2	Pequeña	Negro
IBC 306-95	24.0	Pequeña	Rojo
RBF 14-54	23.9	Pequeña	Negro
SER 16	23.8	Pequeña	Rojo
ALS 9951-101-R1	23.4	Pequeña	Rojo
RBF 19-63	23.3	Pequeña	Negro
IBC 309-13	23.2	Pequeña	Rojo
IBC 308-15	23.1	Pequeña	Rojo
RBF 11-33	22.8	Pequeña	Negro
IBC 309-23	22.7	Pequeña	Rojo
MER 2212-28	22.6	Pequeña	Rojo
SEA 5	22.5	Pequeña	Crema
Salagnac 90	22.3	Pequeña	Rojo moteado
RBF 14-34	22.2	Pequeña	Negro
MER2226-28	22.0	Pequeña	Rojo
PR0340-3-3-1	21.7	Pequeña	Rojo
RBF 11-36	21.7	Pequeña	Negro
RBF 15-17	21.6	Pequeña	Negro
MEN 2201-64	21.5	Pequeña	Negro
X02-33-147-3	21.2	Pequeña	Negro
IBC 305-67	20.6	Pequeña	Rojo
IBC 301-182	20.6	Pequeña	Rojo
Verano	20.5	Pequeña	Blanco
PR 0333-27	20.4	Pequeña	Negro
MEN 2207-44	19.9	Pequeña	Negro
XRAV 117-2	19.7	Pequeña	Negro
BAT 477	19.7	Pequeña	Crema
XRAV 96-11	19.3	Pequeña	Negro
PR0443-151	16.9	Pequeña	Negro
XRAV 71-2	16.9	Pequeña	Negro

Cuadro 21: continuación

Línea	Peso específico (g/100 semillas)	Clasificación	Color
Morales	16.1	Pequeña	Blanco
PR 0301-181	15.9	Pequeña	Blanco
CV (%)	6.8		
DMS Tukey0.05	2.8		
Promedio	21.7		

Cuadro 20: Peso específico de semillas por color de las líneas del experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.

Color	Peso específico (g/100 semillas)
Rojo	23.0 a
Crema	22.3 a
Negro	21.0 b
Blanco	17.5 c
DMS _{tukey.05}	1.2
CV (%)	11.3

Las líneas de color rojo y las de color negro tuvieron comportamientos diferentes en cuanto a rendimiento en grano y peso específico. En el caso de las líneas con grano rojo, la relación lineal positiva ($R^2=0.57$) entre rendimiento en grano y peso específico (Figura 14) sugiere que el tamaño de la semilla influyó en los rendimientos pues las líneas de grano mas pesado son las que tuvieron mayores rendimientos. Araujo et al. (2003) encontraron relaciones similares entre rendimiento en grano y peso específico de semillas ($R^2=0.63$, $p<0.01$) para once líneas de habichuela cuyo peso específico promedio fue de 23.5 g. Para las líneas de color negro se observó lo contrario con una relación lineal negativa ($R^2=0.68$), las líneas de semillas livianas fueron las mas rendidoras (Figura 6).

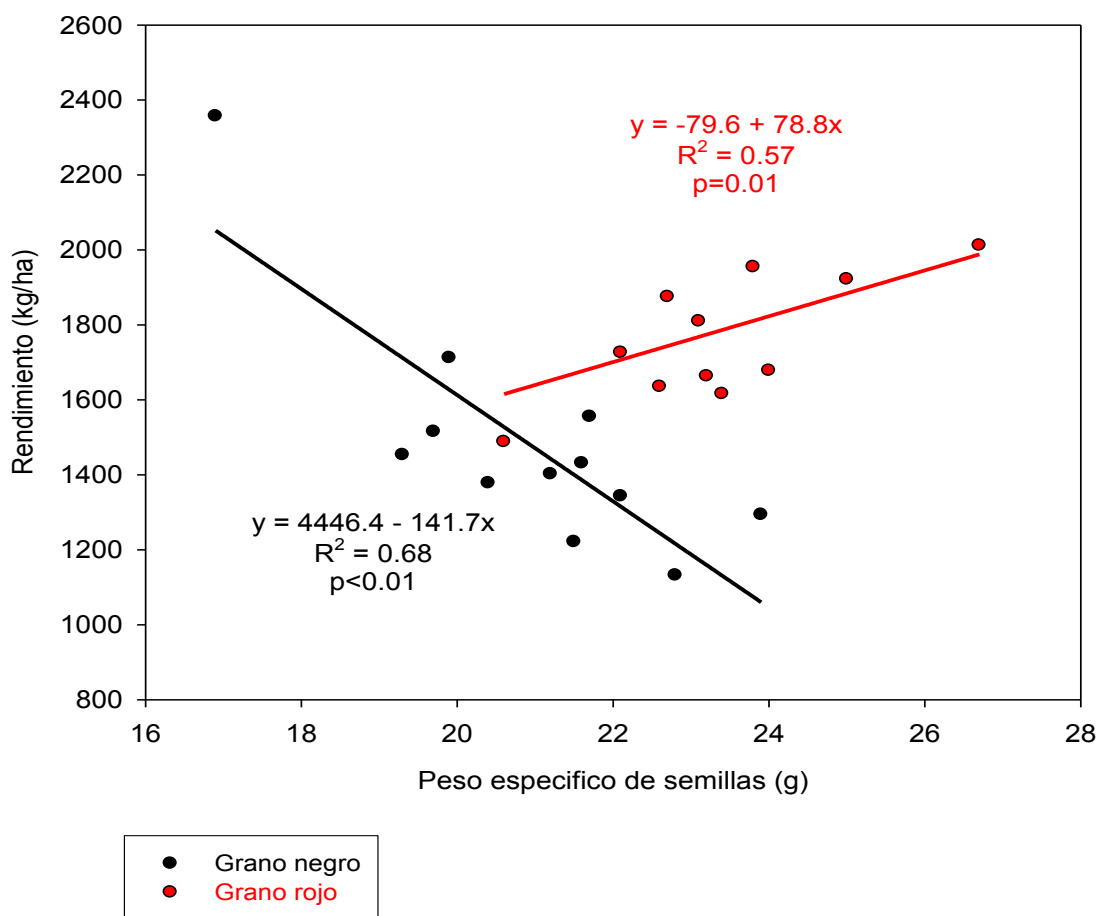


Figura 6: Relación lineal entre rendimiento en grano y peso específico de 100 semillas para las líneas de grano rojo y de grano negro en el experimento de baja fertilidad, Isabela, junio 2007.

5.2.4 Relaciones entre rendimiento en grano y sus componentes (EA, EU)

5.2.4.1 Junio 2007

En la siembra de junio 2007 se observaron relaciones lineales positivas entre eficiencia agronómica y rendimiento potencial tanto bajo estrés de N como bajo estrés de P ($p < 0.01$) (Figura 7) lo que indicó que las líneas con mayores rendimientos en el tratamiento de fertilidad completo fueron las que respondieron mas a la aplicación de N y de P. Para cada aumento de una unidad de EA en el tratamiento de fertilidad menos N y menos P hubo un aumento de rendimiento

en el tratamiento de fertilidad completo de 32 kg ha⁻¹ y 45 kg ha⁻¹ respectivamente, lo que sugiere que el N fue el factor nutricional mas limitante ya que el rendimiento aumenta con la EA a una mayor magnitud bajo estrés de P que bajo estrés de N. Dos Santos y Fageria, 2007 reportaron aumentos de rendimiento de 86 kg por cada aumento de una unidad de EA.

Se observaron relaciones cuadráticas negativas entre eficiencia agronómica y rendimiento relativo tanto bajo estrés de N como bajo estrés de P (Figura 8), lo que sugiere que las líneas con mayor respuesta a la aplicación de N y de P (mayores valores de EA) tuvieron menores valores de rendimiento relativo. Bajo estrés de N el rendimiento relativo disminuye hasta un valor mínimo de 26% y la EA aumenta hasta un valor máximo de 38 (Figura 8, puntos cerrados). Eso indica que la mayor respuesta que se obtuvo por cada kg de N que se aplicó fue de 38 kg de grano y que las líneas produjeron por lo mínimo 26% del rendimiento potencial (rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo). Bajo estrés de P, el rendimiento relativo disminuyó hasta un valor mínimo de 65% y la EA aumentó hasta un valor máximo de 22 (Figura 8, puntos abiertos), lo que indica que la mayor respuesta que se obtuvo por cada kg de P₂O₅ que se aplicó fue de 22 kg y que las líneas produjeron por lo mínimo 65% del rendimiento potencial.

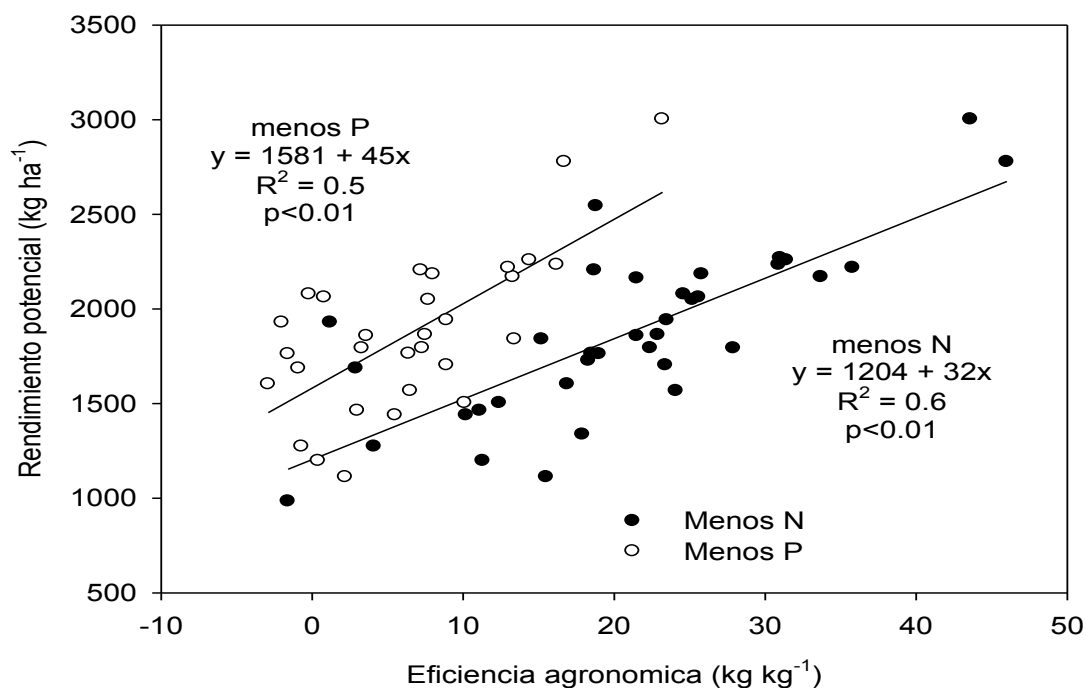


Figura 7: Relación entre eficiencia agronómica bajo estrés de N y de P y rendimiento potencial (tratamiento de fertilidad completo) y en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

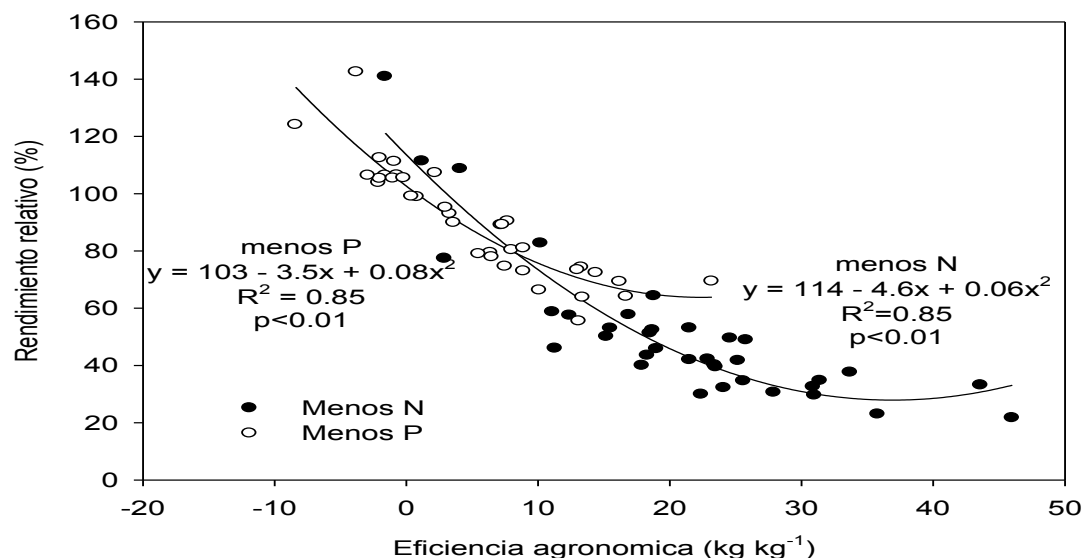


Figura 8: Relación entre eficiencia agronómica y productividad relativa bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

Se observaron relaciones lineales positivas entre eficiencia de uso tanto bajo estrés de N ($p=0.01$) como bajo estrés de P ($p<0.01$) y rendimiento en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P (Figura 9). Para cada aumento de una unidad de EU hubo un aumento de rendimiento de 30 kg ha^{-1} bajo estrés de N (Figura 9, puntos cerrados) y 31 kg ha^{-1} bajo estrés de P (Figura 9, puntos abiertos) respectivamente, lo que sugiere que el rendimiento aumenta con la EU a la misma magnitud tanto bajo estrés de N como bajo estrés de P. El valor obtenido bajo estrés de N difiere de lo obtenido por Dos Santos y Fageria (2007) que reportaron aumento en rendimiento de 10 kg ha^{-1} por cada aumento de una unidad de EU en un experimento realizado en Brasil con 6 líneas de habichuela. Muurinen et al. (2006) reportaron también aumento en rendimiento de 50 y 60 kg ha^{-1} por cada aumento de una unidad de EU para trigo y avena, respectivamente.

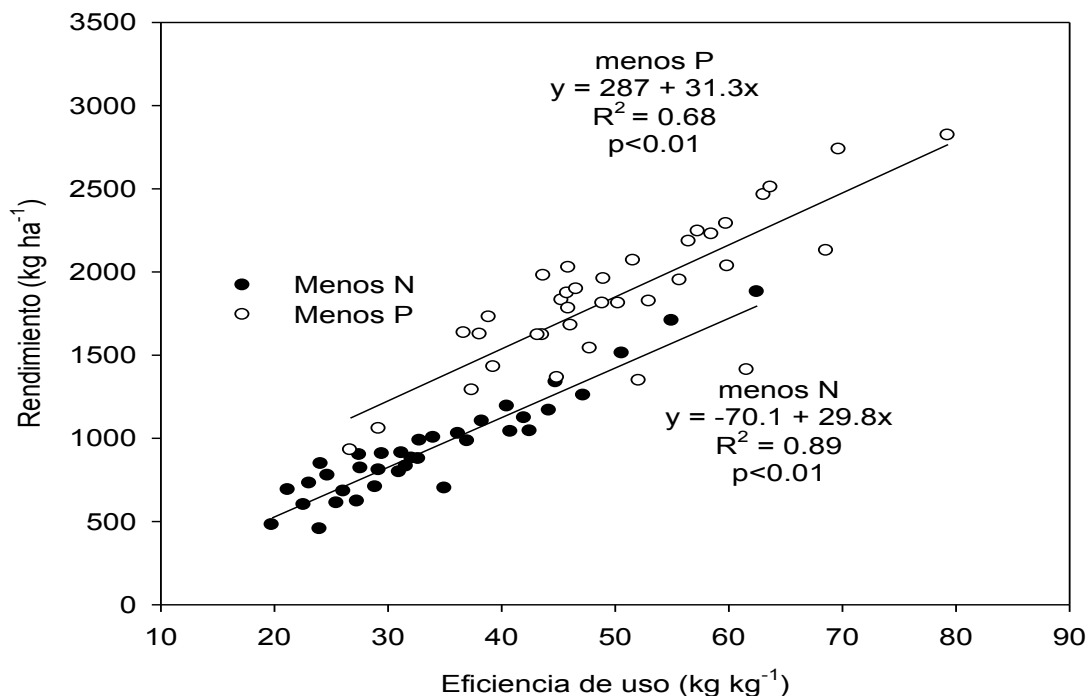


Figura 9: Relación entre rendimiento en grano y eficiencia de uso (EU) bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

5.2.4.2 Enero 2008

Al igual que en la siembra de junio 2007, para enero 2008 se observaron relaciones lineales positivas entre eficiencia agronómica tanto bajo estrés de N ($p < 0.01$) como bajo estrés de P ($p < 0.01$) y rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo (Figura 10). Para cada aumento de una unidad de EA hubo un aumento de rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo de 19 kg bajo estrés de N y 22 kg bajo estrés de P respectivamente, lo que sugiere que el rendimiento aumenta con la EA a la misma magnitud tanto bajo estrés de N como bajo estrés de P. Comparativamente con junio se observó una disminución de 50% de esta tasa de aumento.

Se observaron relaciones cuadráticas negativas entre eficiencia agronómica y rendimiento relativo tanto bajo estrés de N como bajo estrés de P (Figura 11), lo que sugiere que las líneas con mayor respuesta a la aplicación de N y de P (mayores valores de EA) tuvieron menores valores de rendimiento relativo. Bajo estrés de N el rendimiento relativo disminuyó hasta un valor mínimo de 41% y la EA aumentó hasta un valor máximo de 32 (Figura 11, puntos cerrados). Eso indica que la mayor respuesta que se obtuvo por cada kg de N que se aplicó fue de 32 kg de grano y que las líneas produjeron por lo mínimo 41% del rendimiento potencial (rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo). Bajo estrés de P, el rendimiento relativo disminuye hasta un valor mínimo de 33% y la EA aumenta hasta un valor máximo de 39 (Figura 11, puntos abiertos), lo que indica que la mayor respuesta que se obtuvo por cada kg de P_2O_5 que se aplicó fue de 39 kg y que las líneas produjeron por lo mínimo 33% del rendimiento potencial.

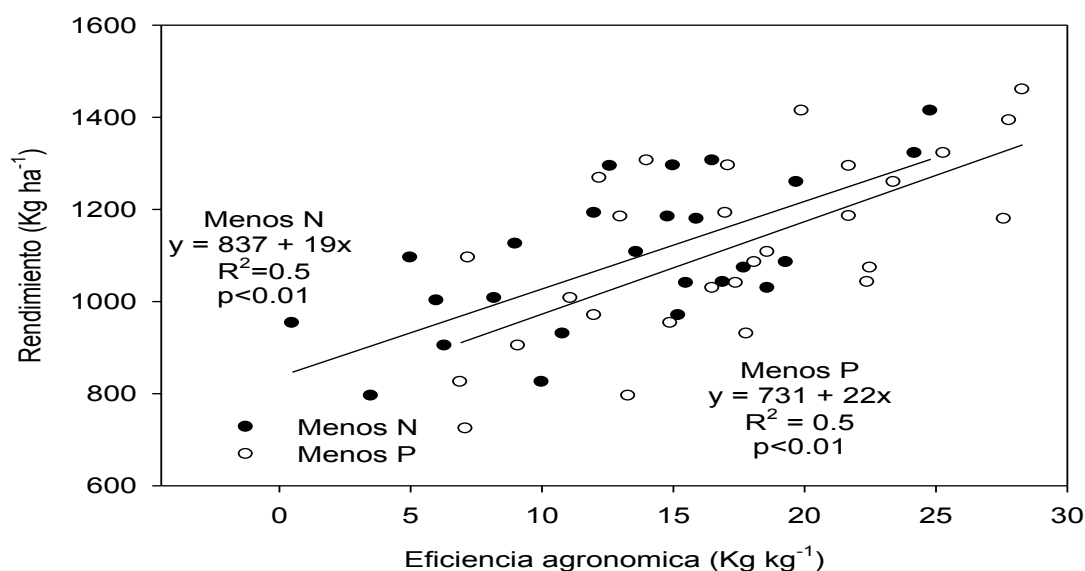


Figura 10: Relación entre rendimiento en grano (tratamiento de fertilidad completo) y eficiencia agronómica bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.

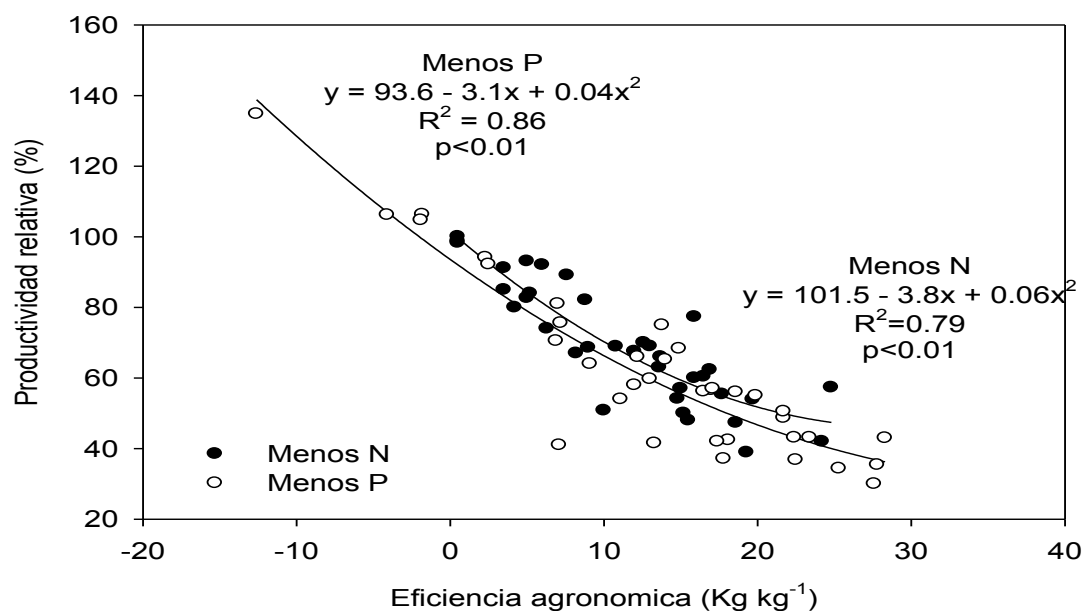


Figura 11: Relación entre eficiencia agronómica y productividad relativa bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P. Isabela, enero 2008.

Al igual que en la siembra de junio 2007, se observaron relaciones lineales positivas entre rendimiento en grano y eficiencia de uso tanto bajo estrés de N ($p < 0.01$) como bajo estrés de P ($p < 0.01$). Para cada aumento de una unidad de EU hubo un aumento de rendimiento de 19 kg/ha bajo estrés de N y 43 kg/ha bajo estrés de P respectivamente (Figura 12), lo que sugiere que los rendimientos aumentan con la EU dos veces mas bajo estrés de P que bajo estrés de N. El valor obtenido bajo estrés de N fue parecido a lo obtenido por Dos Santos y Fageria (2007) que reportaron aumento en rendimiento de 10 kg/ha por cada aumento de una unidad de EU en un experimento realizado en Brasil con 6 líneas de habichuela.

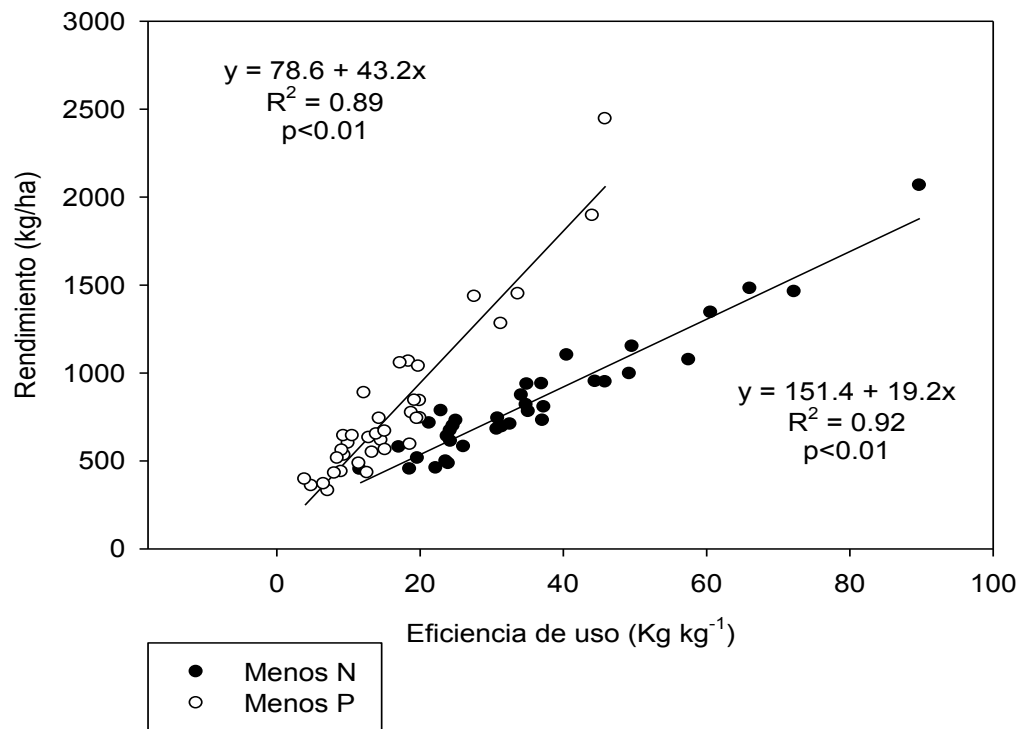


Figura 11: Relación entre rendimiento en grano y eficiencia de uso (EU) bajo estrés de N y de P en el experimento de selección de líneas de habichuela. Isabela, enero 2008.

5.2.5 Contenido de nutrientes en el suelo

5.2.5.1 junio 2007

Los resultados del análisis de suelo para el ensayo de junio 2007 se presentan en el Cuadro 18. De manera general se observó que el suelo fue de fertilidad mediana, pues tuvo niveles medianos en el suelo para elementos esenciales como el pH, el N extraíble en forma de nitratos, el Ca, el Mg, el K y el CIC, solamente la materia orgánica y el P tuvieron valores altos. Al mismo tiempo se observó que algunos elementos como el Mn, el Fe y el Cu tuvieron niveles altos también. Los niveles en el suelo encontrados para MO, P, Ca y Mg concuerdan con los reportados por Sotomayor-Ramírez y Martínez, 2006A en un estudio realizado sobre 1168 muestras de suelo a través de todo Puerto Rico. Estos autores encontraron que un 77% de las muestras tuvieron niveles de MO que varían de mediano a alto, 72% tuvieron niveles de P alto, 53% y 56% respectivamente tuvieron niveles bajos de Mg y de K. Valores similares a los encontrados fueron reportados por Fageria y Baligar (2004) para Oxisol de Brasil para algunos elementos como el pH (5.4), el Ca ($2.5 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$), el Mg ($0.9 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$), el Mn (8 ppm) y el Fe (33 ppm) (Cuadro 21).

Cuadro 21: Principales características químicas del suelo antes de la siembra y de la aplicación de los fertilizantes en el experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

Fertilidad	pH	MO	NO ₃ ⁻ N ---mg kg ⁻¹ ---	P --cmol _c kg ⁻¹ --	Ca	Mg	K	CIC	Fe -----ppm-----	Mn	Zn	Cu
Media	5.47	4.0	15.7	20.7	3.9	0.58	0.26	6.7	23.1	8.6	0.49	2.7
Nivel en suelo*	M	A	M	A	M	B	M	M	A	A	M	A
CV (%)	6.5	5.1	35.1	16.0	13.9	8.8	13.5	9.5	31.6	42.6	11.5	8.6

*Nivel fertilidad en el suelo según Sotomayor-Ramírez, 2006: B=bajo, M=mediano, A=Alto.

Se observó una relación cuadrática entre rendimiento en grano y pH (Figura 13). El rendimiento máximo se obtuvo con un pH de 6.1; el 95%, 90%, 75% y 50% del rendimiento máximo se obtuvieron a pH de 5.9, 5.8, 5.6 y 5.4 respectivamente. Estos valores difieren de los reportados por Abruña-Rodríguez

et al. (1982) en Ultisoles y Oxisoles de Puerto Rico para habichuelas secas donde obtuvieron el 95%, 90%, 75% y 50% del rendimiento máximo a valores de pH de 5.3, 5.2, 4.9 y 4.5 respectivamente.

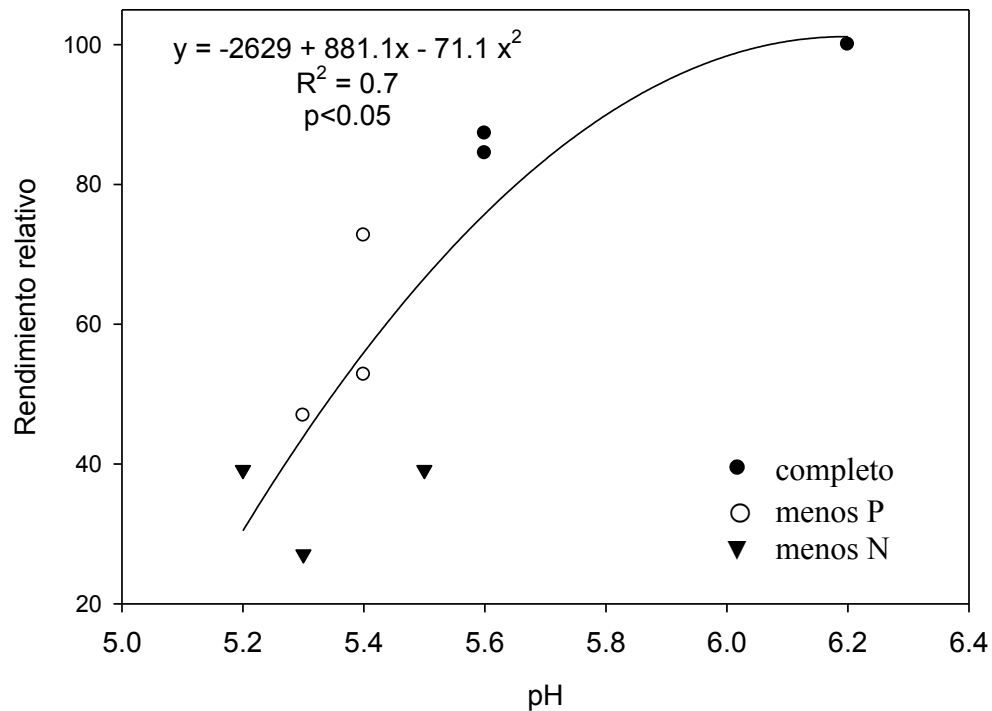


Figura 13: Relación entre el rendimiento relativo y el pH en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

También se observaron relaciones cuadráticas positivas entre rendimiento en grano, N y P (Figura 14). El rendimiento aumentó con el contenido de N y de P hasta valores críticos de 18.8 ppm para el N y 28.2 ppm para el P respectivamente

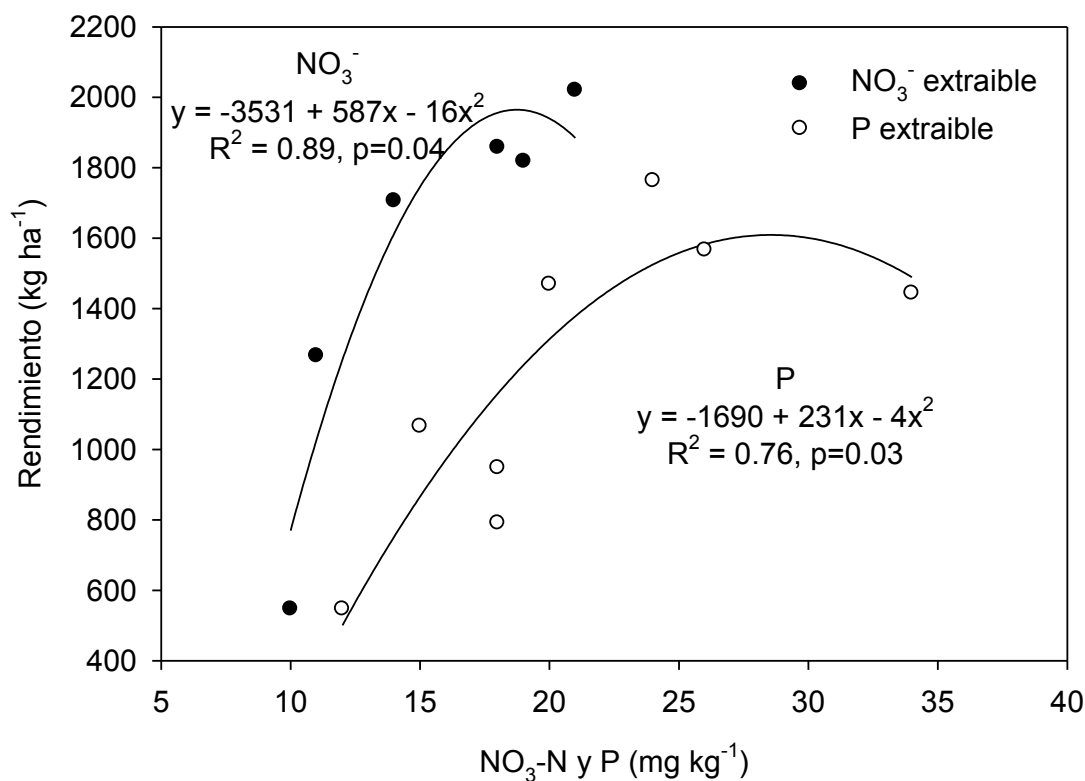


Figura 14: Relación entre el rendimiento en grano y el NO₃⁻ extraíble y el P extraíble en el suelo en el experimento de selección de líneas de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, junio 2007.

5.2.5.2 enero 2008

Los resultados del análisis de suelo para el ensayo de enero 2008 se presentan en el Cuadro 19. Al igual que junio 2007, el suelo fue de fertilidad mediana, pues tuvo niveles medianos en el suelo para elementos esenciales como pH, MO, P, Ca, Mg, K y Zn. A diferencia de junio 2007, tuvo nivel bajo de N y de Mg. Algunos elementos, al igual que junio 2007, como el Mn, el Fe y el Cu tuvieron niveles altos (Cuadro 22).

Cuadro 22: Principales características químicas del suelo antes de la siembra y de la aplicación de los fertilizantes en el experimento de selección de líneas eficientes en la adquisición de N y de P, Isabela, enero 2008.

Fertilidad	pH	MO	NO ₃ -N ----mg kg ⁻¹ ---	P --cmol _c kg ⁻¹ --	Ca	Mg	K	CIC	Fe	Mn	Zn	Cu
Media	5.91	3.6	9.7	19.1	5.0	0.64	0.26	6.8	35.4	33.0	0.72	3.0
Nivel en suelo*	M	M	B	M	M	B	M	M	A	A	M	A
CV (%)	9.2	3.0	23.2	18.6	26.7	5.2	13.1	12.1	46.7	38.4	25.6	9.9

*Nivel fertilidad en el suelo según Sotomayor-Ramírez, 2006: B=bajo, M=mediano, A=Alto.

5.3. Experimento 3: Caracterización de la arquitectura del sistema radicular.

Para el experimento de la caracterización de la arquitectura del sistema radicular se escogieron cinco de las líneas evaluadas en el experimento 2, los dos testigos (Morales, Salagnac 90) y tres líneas (VAX 3, PR 0443-151, SER 16) con comportamiento diferente en término de eficiencia y de respuesta bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P. La línea VAX 3 fue eficiente y no respondedora a la aplicación de N y de P, PR 0443-151 fue una línea eficiente y respondedora a la aplicación de N y de P mientras que SER 16 fue una línea ineficiente y respondedora a la aplicación de N y de P (Cuadro 23). Se espera que una línea eficiente y no respondedora tendría un sistema radicular superficial bajo estrés de P y de N (Lynch y Ho, 2005; Lynch, 2007), una línea eficiente y respondedora tendría un sistema radicular mixto tanto bajo estrés de N como de P, mientras que una línea ineficiente y respondedora tendría un sistema radicular profundo tanto bajo estrés de N como de P. Se espera también que una línea eficiente bajo estrés de N y de P aumente la producción de raíces laterales (Lynch y Brown, 2006).

Cuadro 23: Comportamiento en termino de eficiencia y respuesta de las líneas evaluadas en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Líneas	Menos N		Menos P	
	Junio 2007	Enero 2008	Junio 2007	Enero 2008
VAX 3	Ef, NR	Ef, NR	Ef, NR	Ef, NR
PR 0443-151	Ef, R	Ef, R	Ef, NR	Ef, R
SER 16	Inef, R	Inef, R	Ef, R	Inef, R
Morales	Inef, R	Ef, NR	Ef, NR	Inef, R
Salagnac 90	Inef, NR	Inef, R	Ef, NR	Inef, R
Ef = Eficiente Inef = Ineficiente R = Respondedora NR = No Respondedora				

5.3.1 Vainas por planta

En el caso de la variable vaina/planta se encontró un efecto de la interacción fertilidad*línea ($p=0.01$) (Cuadro 24). En los tres tratamientos de fertilidad, PR0443-151 resultó ser la línea con mayor número de vainas/planta y es una de las razones por la cual fue una de las líneas más sobresalientes en término de rendimiento. Aparentemente esta línea compensa su bajo peso específico de semillas por una alta producción de vainas (Cuadro 24). Por lo general, las líneas con mayores rendimientos bajo los tres tratamientos de fertilidad tienden a producir mayor numero de vainas, ya que se observó una relación directa y positiva ($R^2=0.63$, $p<0.05$) entre el numero de vainas por planta y el rendimiento en grano (Figura 15). Una relación similar entre rendimiento en grano y numero de vainas por planta ($r=0.538$, $p<0.001$) fue obtenido por Araujo et al. (2000) evaluando ocho líneas de habichuela bajo dos niveles de P. Estos autores indican también que el numero de vainas por planta es uno de los componentes de rendimiento que mas afecta los rendimientos bajo estrés de nutriente, especialmente el P. Wahab et al. (1985) reportaron también una correlación positiva entre ($r=0.89$, $p<0.05$) entre vainas por planta y rendimiento en grano en la evaluación de once líneas de habichuela. Yan et al. (1995) encontraron que el rendimiento se relacionó positivamente con el numero de vainas por planta tanto bajo condiciones de baja disponibilidad de P ($r=0.71$, $p<0.01$) como de alta disponibilidad de P ($r=0.73$, $p<0.01$) en un experimento realizado con doce líneas de habichuela.

Cuadro 24: Numero de vainas/planta de 5 líneas en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Línea	Completa	Menos P	Menos N
	Vainas/planta		
PR 0443-151	37.3 a	23.7 b	36.0 a
VAX 3	19.0 a	16.7 a	18.0 a
SER 16	23.3 a	16.3 b	9.3 c
Morales	21.0 a	20.0 a	6.7 b
Salagnac 90	14.0 a	15.7 a	7.3 b
DMS _{tukey.05}	8.1	8.1	8.1
CV (%)		31.6	
p-valor		0.01	

Letras iguales dentro de la misma fila indican no diferencia al .05

El DMS sirve para comparar entre líneas dentro de un tratamiento de fertilidad

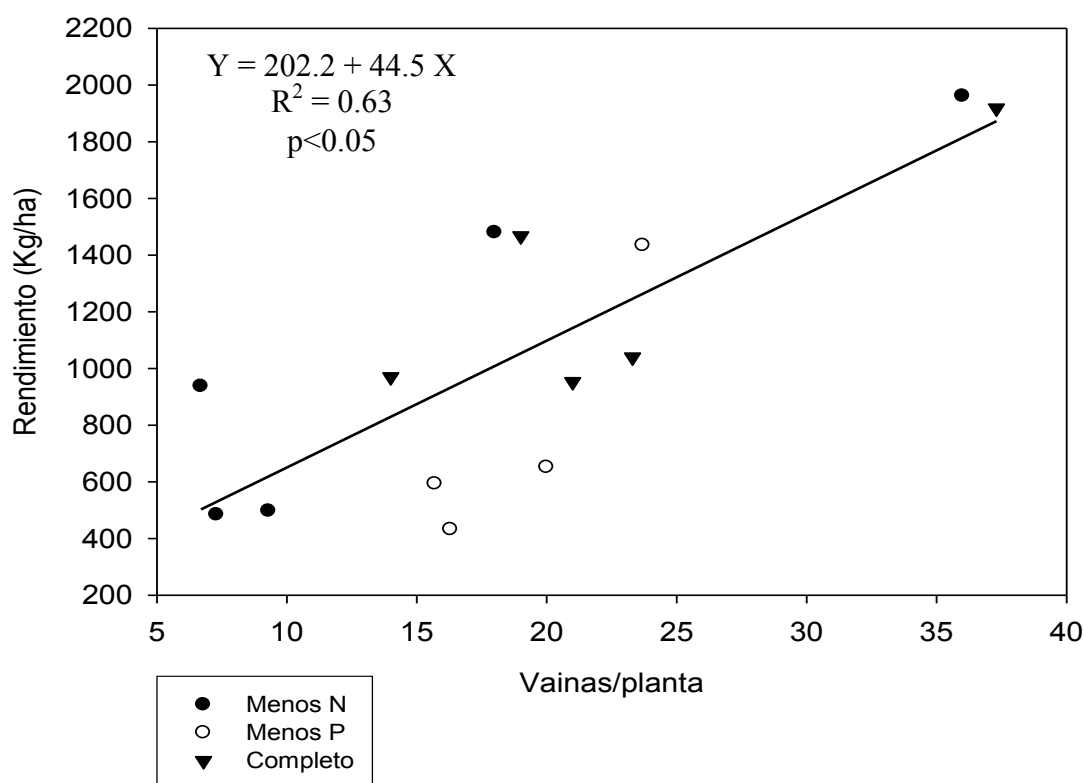


Figura 15: Relación entre el rendimiento en grano y el numero de vainas por planta en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

5.3.2 Biomasa aérea

En la etapa vegetativa, no hubo efecto de la interacción línea*fertilidad, ni fertilidad, lo que indica que a esta etapa de desarrollo, los fertilizantes aplicados no afectaron la planta y que el desarrollo de la planta estuvo influenciado solamente por el genotipo. Las mejores líneas en término de biomasa aérea fueron las líneas eficientes PR0443-151 y VAX 3 con 952 kg ha⁻¹ y 837 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 25). Resultados similares fueron reportados por Liao et al., 2001 al evaluar, bajo condiciones de invernadero, cinco genotipos de habichuela bajo dos dosis de P. En esta investigación, los autores encontraron que no hubo interacción entre dosis de P y genotipo en la etapa vegetativa para peso seco de vástago, pero si hubo efecto principal de genotipo donde las líneas eficientes bajo condiciones de estrés de P tuvieron mayor biomasa aérea. Dos Santos y Fageria (2007) tampoco encontraron diferencia significativa entre tratamientos de N (sin N y aplicación de 90 kg ha⁻¹) en un estudio realizado en Brasil pero si encontraron diferencia significativa entre genotipos para biomasa aérea 17 días después de germinación.

Cuadro 25: Biomasa aérea por línea al final de la etapa vegetativa (4 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Línea	Biomasa (kg ha ⁻¹)
PR 0443-151	952 a
VAX 3	837 ab
Salagnac 90	622 bc
Morales	505 c
SER 16	480 c
DMS _{tukey0.05}	345
CV (%)	36.6
p-valor	<0.01

En la etapa de floración, hubo un efecto de la interacción línea*fertilidad (p=0.02) (Cuadro 26). En el tratamiento de fertilidad completa y menos N, las líneas con mayor biomasa fueron PR0443-151 y VAX 3 mientras que para la

fertilidad menos P la línea con mayor biomasa fue VAX 3 (Cuadro 26). Cabe señalar que PR0443-151 y VAX 3 fueron eficientes bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P. Resultados similares fueron reportados por Nielsen et al. (1999) para las líneas eficientes G19839 y G2333 que obtuvieron mayor biomasa aérea bajo condiciones de baja disponibilidad de P. Liao et al. (2001) encontraron también que las líneas eficientes G19833 y G19839 produjeron mayor biomasa aérea que la línea ineficiente DOR 364 bajo condiciones de baja disponibilidad de P. La línea VAX 3, que es eficiente y no respondedora a la aplicación de N y de P, produjo la misma cantidad de biomasa aérea en los tres tratamientos de fertilidad. La línea PR 0443-151, que es eficiente y respondedora a la aplicación de N, produjo la misma cantidad de biomasa en los tratamientos de fertilidad completo y menos N. La línea SER 16, que es ineficiente y respondedora a la aplicación de N y de P, produjo mayor biomasa en el tratamiento de fertilidad completo (Cuadro 26). La correlación positiva y significativa ($R^2=0.61$, $p<0.01$) entre rendimiento en grano y biomasa aérea (Figura 16) sugiere que las mejores líneas en termino de rendimiento tuvieron también mayor biomasa, independientemente del tratamiento de fertilidad. Araujo et al. (2003) reportaron también relaciones positivas entre biomasa aérea y rendimiento en dos siembras realizadas en 1998 ($r=0.94$, $p<0.01$) y en 1999 ($r=0.90$, $p<0.01$) entre once líneas de habichuela.

Cuadro 26: Biomasa por línea y por régimen de fertilización al final de la floración (8 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Línea	Completa	Menos P	Menos N
		Biomasa (kg ha^{-1})	
PR 0443-151	4423 a	2928 b	4585 a
VAX 3	4650 a	3465 a	4090 a
SER 16	4015 a	2334 b	1693 b
Morales	3103 a	2489 a	879 b
Salagnac 90	2078 a	2738 a	1384 b
DMS _{tukey0.05}		1586	
CV (%)		34.7	
p-valor		0.02	

Letras diferentes dentro de la misma fila indican diferencia significativa al 5%.
El DMS sirve para comparar entre líneas dentro de un tratamiento de fertilidad.

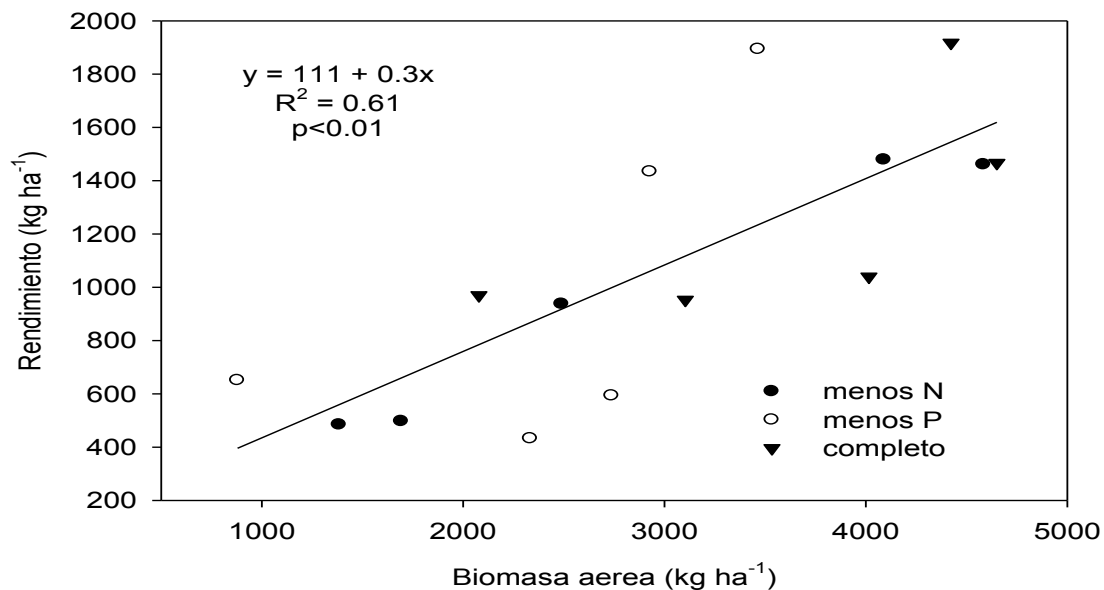


Figura 16: Relación entre el rendimiento en grano y el peso seco de vástago al final de la floración en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

5.3.3 Peso seco raíz y razón peso seco raíz: vástago

Las líneas Salagnac 90 y Morales son ineficientes en la utilización de N y de P y tuvieron mayor peso de raíz en el tratamiento de fertilidad completa que en menos P y menos N. Las líneas PR0443-151 y SER 16 las cuales respondieron a la aplicación de N y de P tuvieron igual producción de raíces en los tres tratamientos de fertilidad (Cuadro 27). La línea VAX 3 que es eficiente y no respondedora produjo mayor peso de raíz en los tratamientos menos N y menos P que en el tratamiento de fertilidad completo. En el tratamiento de fertilidad completo las líneas ineficientes Morales y Salagnac 90 tuvieron mayor peso seco de raíz, mientras que en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P las líneas eficientes PR0443-151 y VAX 3 tuvieron mayor peso seco de raíz. Kimani et al. (2007) y Kimani y Tongoona (2008) reportaron también valores mayores de peso seco de raíz para las líneas CAL 143 y CIM 9314-36 tolerantes a baja disponibilidad de N y de P.

Cuadro 27: Peso seco de raíz por línea y por tratamiento de fertilización al final de la floración (8 semanas después de germinación) en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Línea	Completa	Menos P	Menos N
Peso seco raíz (Kg ha ⁻¹)			
PR 0443-151	56 a	54 a	52 a
VAX 3	46 b	69 a	62 a
SER 16	29 a	37 a	29 a
Morales	65 a	19 b	32 b
Salagnac 90	92 a	53 b	24 c
DMS _{tukey0.05}		24	
CV (%)		26.9	
p-valor		0.01	

Letras diferentes dentro de la misma fila indican diferencia significativa al 5%.
El DMS sirve para comparar entre líneas dentro de un tratamiento de fertilidad.

La correlación positiva entre peso seco de raíz y rendimiento en el tratamiento de fertilidad menos P ($r=0.87$, $p<0.05$) y menos N ($r=0.95$, $p<0.01$) (Cuadro 28) sugiere que bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P, las líneas eficientes como VAX 3 y PR0443-151 tienden a producir mayor biomasa de raíz y por ende mayor rendimiento. Bajo condiciones de alta fertilidad, las líneas eficientes tienden a producir menor biomasa de raíz para un máximo rendimiento, indicado por una correlación negativa entre rendimiento y peso seco de raíz ($r=-0.65$, $p=0.05$) (Cuadro 28).

Cuadro 28: Coeficientes de correlación (Pearson) entre peso seco de raíz y rendimiento en grano en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Variable	Peso seco raíz (kg ha ⁻¹)		
	Completa	Menos P	Menos N
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	-0.65	0.87	0.95
p-valor	0.05	<0.05	<0.01

La razón peso seco raíz:vástago permite evaluar la arquitectura del sistema radicular de una línea en términos de eficiencia. Por lo general, los genotipos

eficientes bajo condiciones de baja fertilidad tienden a tener una razón raíz:vástago mayor bajo condiciones de estrés. Solamente VAX 3 tuvo mayor razón raíz:vástago en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P comparado con el completo, por eso es eficiente bajo condiciones de baja fertilidad. Las líneas respondedoras como SER 16 y PR0443-151 tuvieron razón raíz: vástago iguales en los tres tratamientos de fertilidad. Las líneas ineficientes como Salagnac 90 tuvo razón raíz: vástago mayor en el tratamiento de fertilidad completo que en menos N y menos P. Morales parece tener tolerancia a condiciones de baja disponibilidad de N (siembra de enero 2008) pero no a P porque tuvo mayor peso seco raíz:vástago en el tratamiento de fertilidad menos N comparado con los tratamientos completo y menos P (Figura 17). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Melissa et al. (2005) en un trabajo relacionado donde encontró que la línea G19839 eficiente bajo condiciones de estrés de P tuvo un mayor razón raíz:vástago comparado con el tratamiento alto P, mientras que DOR 364 una línea ineficiente mantuvo el mismo proporción bajo ambos tratamientos.

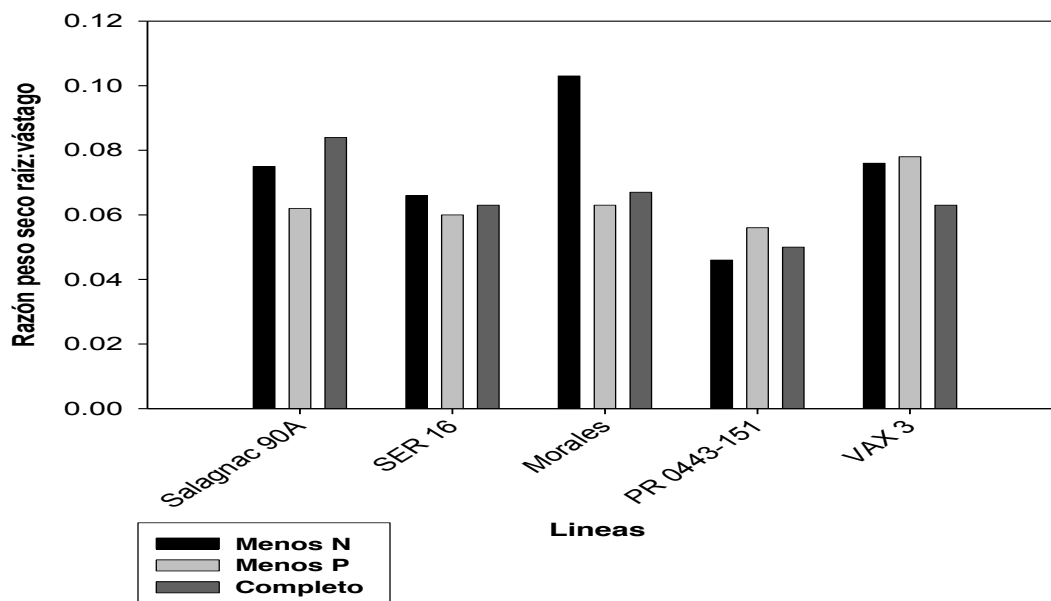


Figura 17: Razón peso seco raíz: vástago por línea y por tratamiento de fertilidad en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

5.3.4 Longitud del sistema radicular

5.3.4.1 Por profundidad

En el tratamiento de fertilidad completo las líneas que son ineficientes tienden a repartir las raíces a mayor profundidad para explorar más volumen de suelo porque no hay limitación de nutrientes (Cuadro 29). Las correlaciones positivas entre rendimiento y longitud radicular a las profundidades de 15-30 cm ($r=0.74$) y >30 cm ($r=0.99$) sugieren que las líneas que produjeron mayor longitud de raíz en estas capas del suelo tuvieron mayores rendimientos (Cuadro 30). Mientras que la correlación negativa entre rendimiento y longitud radicular en la profundidad <15 cm ($r=-0.88$) indica que las líneas que colocaron mayor longitud de raíz en la capa superficial del suelo en el tratamiento de fertilidad completo tuvieron menores rendimientos (cuadro 30).

En el tratamiento de fertilidad menos P (debido a la poca movilidad de este elemento en el suelo), las líneas tienden a concentrar la mayoría de las raíces en la capa superficial (entre un 55% y un 100%) (Cuadro 29). En relación al rendimiento lo contrario a lo observado en el tratamiento completo ocurrió en el tratamiento de fertilidad menos P. Las correlaciones negativas entre rendimiento en grano y longitud radicular en las profundidades 15 – 30 cm ($r=-0.89$) y >30 cm ($r=-0.84$) indicaron que las líneas que produjeron mayor longitud de raíz en estas capas tuvieron menores rendimientos (Cuadro 30). De la misma manera la correlación positiva ($r=0.98$) entre rendimiento y longitud radicular en la profundidad < 15 cm sugiere que las líneas con mayor longitud en la capa superficial tuvieron mayores rendimientos. Correlaciones similares entre longitud radicular y peso seco de vástago en la capa superficial bajo estrés de P fueron reportados por Liao et al. (2001) en un estudio con arena ($r=0.7$, $p<0.01$) y en otro experimento con suelo ($r=0.73$, $p<0.01$).

En el tratamiento de fertilidad menos N las líneas tienden a concentrar las raíces en las profundidades <15 cm y 15-30 cm (Cuadro 29), pero no se

encontraron correlaciones significativas entre rendimiento en grano y longitud radicular en ninguna profundidad.

Cuadro 29: Longitud por línea y fertilidad a tres profundidades en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Fertilidad	Longitud por profundidad (%)			Longitud total (cm)
	< 15 cm	15 – 30 cm	> 30 cm	
a) Morales				
Completo	61	9	30	141.1
Menos N	100	0	0	128.0
Menos P	65	33	2	215.4
b) Salagnac 90				
Completo	100	0	0	255.9
Menos N	54	29	17	785.5
Menos P	100	0	0	245.7
c) SER 16				
Completo	90	10	0	264.5
Menos N	71	29	0	131.3
Menos P	55	28	17	390.8
d) PR 0443-151				
Completo	66	24	10	244.0
Menos N	69	31	0	301.6
Menos P	91	9	0	231.8
e) VAX 3				
Completo	64	32	4	236.4
Menos N	87	13	0	144.3
Menos P	100	0	0	172.2

Cuadro 30: Coeficientes de correlación (Pearson) entre rendimiento en grano y porcentaje de longitud radicular en los tratamientos de fertilidad completo y menos P en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Fertilidad	Profundidad (cm)		
	<15	15 – 30	>30
Completo	-0.88	0.74	0.99
Menos P	0.98	-0.89	-0.84

Bajo condiciones de baja disponibilidad de N, Morales (línea con cierta eficiencia bajo estrés de N) produjo la misma longitud de raíces que en el tratamiento completo pero con una distribución diferente. Morales colocó la totalidad de sus raíces en la capa superficial (<15 cm) al producir un 50% mas de raíces en esta capa (Cuadro 29a). Como se esperaba, tuvo una arquitectura superficial bajo condiciones de baja disponibilidad de N (Figura 18).

Salagnac 90 (ineficiente bajo estrés de N), bajo condiciones de baja disponibilidad de N produjo tres veces más de longitud de raíces que en el caso de la fertilidad completa y repartió sus raíces en las 3 profundidades produciendo el doble de raíces en las profundidades 15-30 cm y > 30 cm (Cuadro 29b). Como se esperaba tuvo una arquitectura profunda bajo condiciones de baja disponibilidad de N (Figura 18).

SER 16 (ineficiente y respondedora bajo estrés de N) produjo una longitud de raíz dos veces menos bajo estrés de N, pero en la profundidad intermedia (15-30 cm) colocó 41% más de longitud al disminuir de 61% la longitud de raíces en la capa superficial del suelo (Cuadro 29c). Tuvo una arquitectura intermedia bajo condiciones de baja disponibilidad de N (Figura 18), comportamiento contrario a lo que se esperaba.

PR0443-151 produjo más longitud de raíces bajo estrés de N comparado con el tratamiento completo. No produjo ninguna raíz en la capa mas profunda del suelo, pero aumento la producción de raíces en las dos capas superiores de un 29% y de un 57%, respectivamente (Cuadro 29d). La línea PR0443-151 tuvo una arquitectura intermedia bajo condiciones de baja disponibilidad de N (Figura 18), como se esperaba.

Bajo estrés de N, VAX 3 produjo menos longitud de raíces, redujo la producción de raíces en las tres capas (Cuadro 29e); como se esperaba tuvo una arquitectura superficial bajo estrés de N (Figura 18).

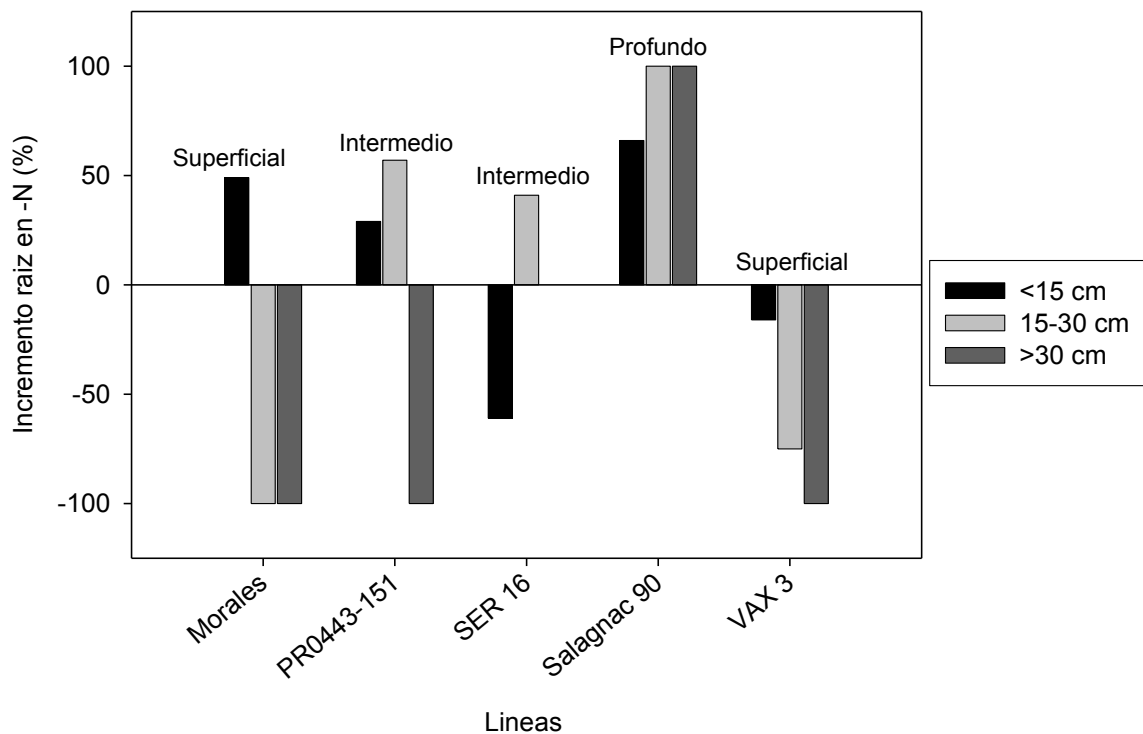


Figura 18. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos N, enero 2008.

Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, Morales (ineficiente bajo estrés de P) tuvo una mayor longitud de raíz comparado con el tratamiento de fertilidad completo (Figura 19). Morales aumentó la producción de raíces en las dos capas superiores de 64% y 47% respectivamente disminuyéndolo de un 91% en la capa mas profunda (>30 cm) (Cuadro 29a). Tuvo entonces una arquitectura intermedia bajo condiciones de baja disponibilidad de P. Parece que la energía gastada en la producción de estas raíces, tratando de buscar el P, afectó mucho de esta línea cuyo rendimiento bajo estrés de P resultó ser 66% menos de lo obtenido bajo estrés de N.

Al contrario de Morales, Salagnac 90 (eficiente en junio 2007 pero ineficiente en enero 2008 bajo estrés de P) mantuvo la misma producción de raíces tanto en el tratamiento de fertilidad completo que bajo menos P (Cuadro 29b) y tuvo también igual comportamiento en los dos casos, entonces tuvo una arquitectura superficial (Figura 19).

SER 16 (ineficiente y respondedora bajo estrés de P) tuvo una mayor producción en cuanto a longitud de raíces (50% más) bajo estrés de P. La línea SER 16 aumentó la longitud de raíces en las capas mas profundas de un 100% disminuyéndolo de un 10% en la capa superficial (Cuadro 29c), entonces tuvo una arquitectura bien profunda bajo condiciones de baja disponibilidad de P (Figura 19). SER 16 resulto ser una línea ineficiente bajo estrés de P, porque trató de buscar este nutriente en las capas profundas del suelo ya que el P es un elemento de poca movilidad que bajo condiciones de insuficiencia se concentra mayoritariamente en las capas superficiales del suelo. Eso explica también los bajos rendimientos de esta línea en el tratamiento de fertilidad menos P. Resultados similares fueron obtenidos por Liao et al. (2001) en la línea ineficiente DOR364 que bajo estrés de P colocó mas longitud radicular en la capa profunda del suelo (1.22 m) que en la capa superficial (0.26 m).

PR0443-151 (eficiente bajo estrés de P) mantuvo la misma longitud de raíces que en el tratamiento de fertilidad completo. La línea PR0443-151 aumentó la longitud en un 31% en la capa superficial disminuyéndola en un 66% en la capa intermedia y en un 100% en la capa más profunda (Cuadro 29d). Tuvo una arquitectura superficial bajo condiciones de baja disponibilidad de P (Figura 19)

Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, VAX 3 (eficiente y no respondedora bajo estrés de P) redujo la longitud de raíces de un 30%, colocando la totalidad de estas en los primeros 15 cm (Cuadro 29e), tuvo entonces una arquitectura superficial (Figura 19). Liao et al. (2001) encontraron que bajo condiciones de baja disponibilidad de P, la línea eficiente G19839 colocó 67% de sus raíces en la capa superficial del suelo mientras que la línea ineficiente DOR 364 colocó solamente un 37% de raíces en la capa superficial del suelo.

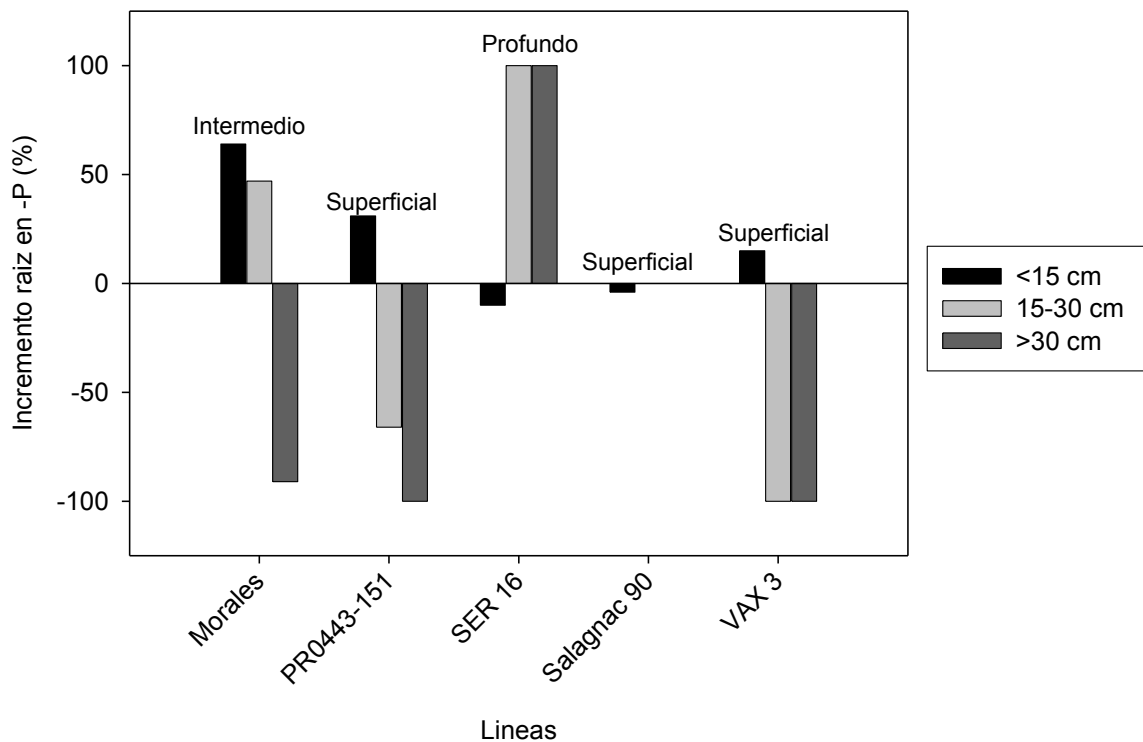


Figura 19. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos P, enero 2008.

Estos resultados indican que la disponibilidad de nutrientes, N y P en particular, y el genotipo regulan la arquitectura del sistema radicular de la habichuela. La respuesta a disponibilidad y/o deficiencia de nutrientes varía entre genotipos y la adaptación a estrés de nutrientes se correlaciona con la habilidad de un genotipo de colocar más cantidades de raíces en los horizontes superficiales del suelo.

5.3.4.1 Por tipo de raíz

Los datos resumidos de longitud de raíz por tipo (laterales y principal) se presentaron en el Cuadro 31. En el tratamiento de fertilidad completo, excepto VAX 3, todas las líneas tienden a producir mayor cantidad de raíces laterales

con una producción que varía entre 60 y 80% de la cantidad total de raíces, mientras que bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P las líneas tienden a tener mayor cantidad de raíces laterales, la cantidad producida varía entre 40 y 70% para menos N y 50 y 70% para menos P, respectivamente. Bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P, la línea eficiente VAX 3 tuvo la mayor longitud total de raíces con 1334 cm y 741 cm respectivamente. Kimani et al. (2007) y Kimani y Tongoona (2008) encontraron también que las líneas de habichuela CAL 143 y CIM 9314-36 tolerantes a baja disponibilidad de N y de P tuvieron mayor longitud de raíces laterales comparado con líneas susceptibles.

La relación cuadrática negativa ($R^2=0.95$, $p=0.01$) observado entre rendimiento y longitud de raíces laterales en el tratamiento de fertilidad completo sugiere que las líneas que produjeron mayor longitud de raíces laterales en este tratamiento de fertilidad tuvieron menores rendimientos (Figura 20). Este resultado difiere de lo obtenido por Kimani y Tongoona (2008) que reportaron una relación positiva ($r=0.86$, $p<0.01$) entre rendimiento y longitud de raíces laterales bajo condiciones de alta disponibilidad de N. Lo contrario a lo observado en el tratamiento de fertilidad completo ocurrió en el tratamiento de fertilidad menos P, pues la relación lineal positiva ($R^2=0.93$, $p=0.01$) observado entre rendimiento y longitud de raíces laterales indicó que las líneas con mayor longitud de raíces laterales en este tratamiento de fertilidad tuvieron mayores rendimientos (Figura 20). El P, siendo un elemento de poca movilidad, se concentra más en las capas superficiales del suelo, entonces las líneas con mayor producción de raíces laterales son capaces de explorar mejor las capas superiores del suelo y producir mayores rendimientos. Al igual que para la profundidad no se observó ninguna relación entre rendimiento y longitud radicular en el tratamiento de fertilidad menos N, pero Kimani y Tongoona (2008) reportaron una relación positiva ($r=0.84$, $p<0.01$) entre rendimiento y longitud de raíces laterales bajo condiciones de baja disponibilidad de N.

Cuadro 31: Longitud por tipo de raíz, línea y fertilidad en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Fertilidad	Longitud por tipo de raíz (%)		Longitud total (cm)
	Laterales	Principal	
	a) Morales		
Completo	83	17	732
Menos N	52	48	686
Menos P	77	23	332
	b) Salagnac 90		
Completo	63	37	1912
Menos N	46	54	1225
Menos P	53	47	386
	c) SER 16		
Completo	82	18	833
Menos N	73	27	732
Menos P	64	36	286
	d) PR 0443-151		
Completo	62	38	514
Menos N	78	22	629
Menos P	62	38	479
	e) VAX 3		
Completo	48	52	853
Menos N	40	60	1334
Menos P	50	50	741

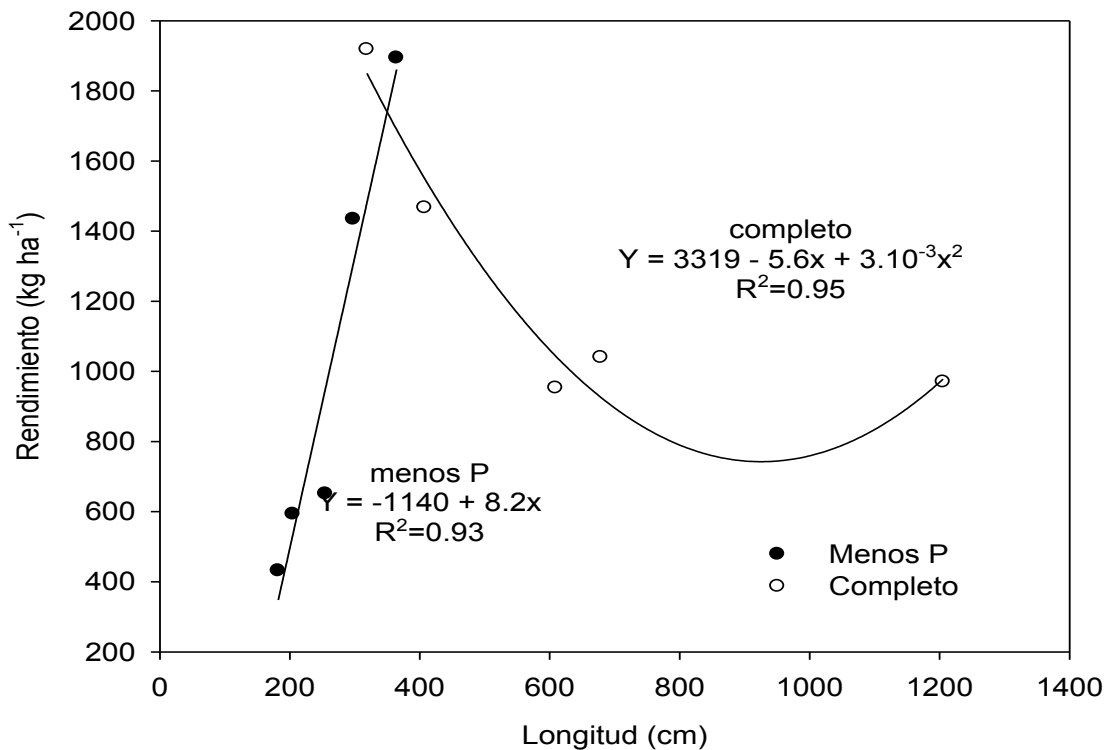


Figura 20. Relación entre rendimiento en grano y longitud de raíces laterales en los tratamientos de fertilidad menos P y completo en el experimento de caracterización de la arquitectura del sistema radicular, Isabela, enero 2008.

Bajo condiciones de baja disponibilidad de N la línea Morales (eficiente bajo estrés de N) produjo la misma cantidad de raíces en los tratamientos de fertilidad completo y menos N pero con una distribución diferente (Cuadro 31a). En el tratamiento de fertilidad menos N disminuyó la longitud de las raíces laterales de un 41% al aumentar la raíz principal de 164% (Figura 21), comportamiento contrario a lo esperado para una línea eficiente.

La línea Salagnac 90 que mostró ser ineficiente y de bajo rendimiento bajo condiciones de baja disponibilidad de N, produjo menor cantidad de raíces en este tratamiento de fertilidad comparado con el completo (Cuadro 31b) disminuyendo la cantidad de raíces laterales de un 53% y la raíz principal de un 7% (Figura 21).

La línea SER 16 (ineficiente pero respondedora a la aplicación de N) produjo la misma cantidad de raíces en los tratamientos de fertilidad completo y menos N (Cuadro 31c), pero disminuyó en un 21% la producción de raíces laterales y aumentó la producción de raíz principal de un 27% (Figura 21).

PR0443-151 (línea eficiente, respondedora y de alto rendimiento bajo condiciones de baja disponibilidad de N), aumentó la producción de raíces laterales de un 53% disminuyendo la producción de raíz principal de un 28% (Cuadro 31d y Figura 21).

VAX 3 (línea eficiente pero no respondedora a la aplicación de N) produjo mayor cantidad de raíces bajo condiciones de baja disponibilidad de N al aumentar la producción de raíces laterales y principal de un 33% y 78% respectivamente (Cuadro 31e y Figura 21). Nielsen et al. (1999), reportaron también que las líneas de habichuela G19839 y G2333 eficientes en la adquisición de P tuvieron mayor longitud de raíz que la línea ineficiente DOR 364.

Como se esperaba, se observó que las líneas ineficientes (Salagnac 90 y SER 16) bajo condiciones de baja disponibilidad de N tienden a disminuir su producción de raíces laterales con relación al tratamiento completo, mientras que las líneas eficientes y de alto rendimiento (PR0443-151 y VAX 3) tienden a aumentar las raíces laterales bajo estas mismas condiciones.

Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, todas las líneas tuvieron menor producción de raíces comparado con el completo tanto en raíces laterales como en raíz principal, pero la reducción de raíces laterales fue mayor para las líneas ineficientes (Morales, Salagnac 90, SER 16) con porcentaje de reducción de 58, 83 y 73% respectivamente (Figura 22) que para las líneas eficientes (PR0443-151 y VAX 3). Las raíces laterales disminuyeron de un 7% y un 10% para PR0443-151 y VAX 3, respectivamente (Figura 22)

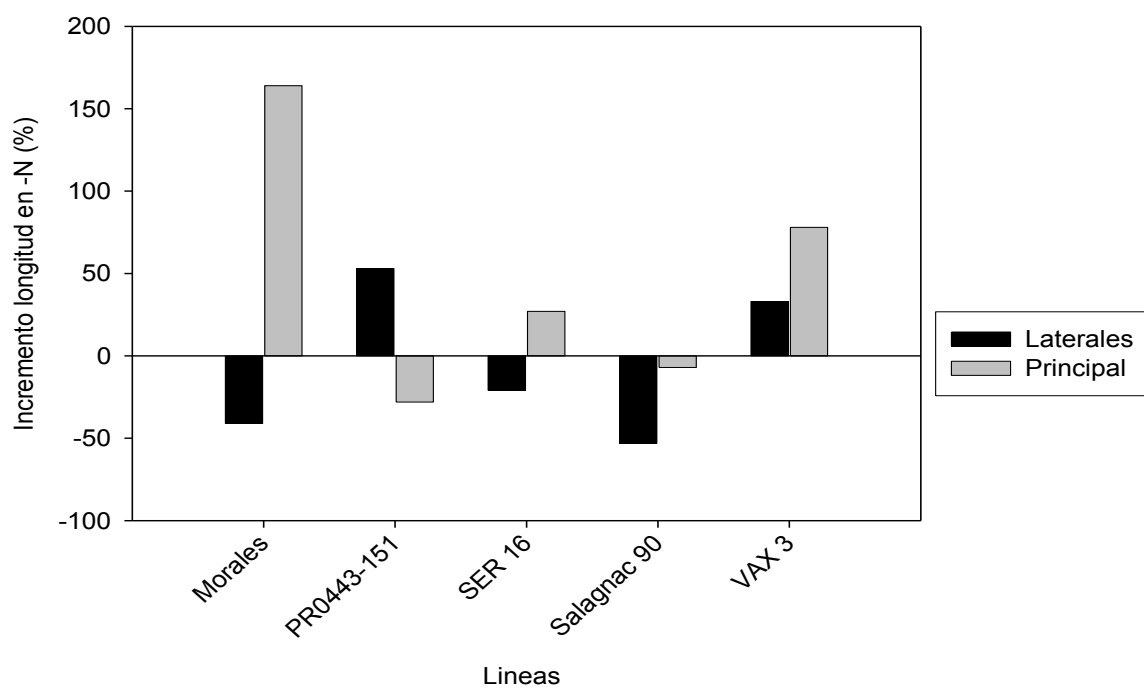


Figura 21. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos N, enero 2008.

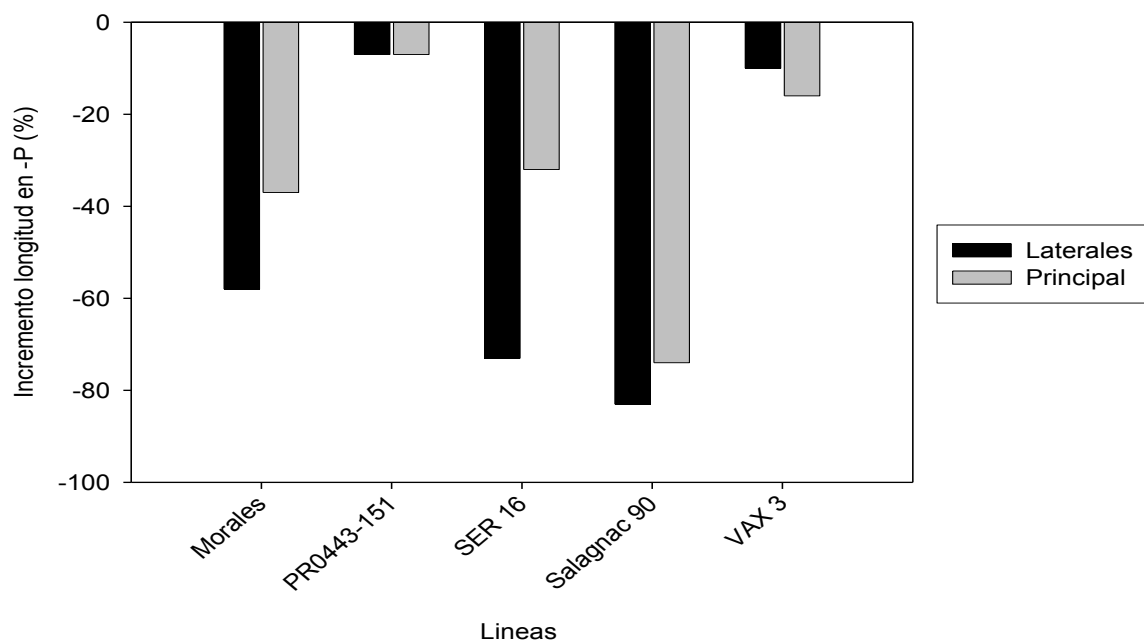


Figura 22. Incremento de longitud de raíces en el tratamiento de fertilidad menos P, enero 2008.

5.4 Experimento 4: adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido.

5.4.1 Rendimiento en grano y eficiencia agronómica

5.4.1.1 Por líneas

El análisis de varianza por línea, fecha y nivel de fertilidad se presenta en el Cuadro 32 para la variable rendimiento en grano. En ambos análisis (por línea y por sistema radicular) hubo diferencia significativa para la interacción sistema radicular*fertilidad*época y línea*fertilidad*época con p-valor de 0.0007 y 0.05 respectivamente, también hubo efecto principal de fertilidad en ambos casos (Cuadro 32).

Cuadro 32: Análisis combinada de varianza para rendimiento en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, Puerto Rico, febrero 07 y enero 08.

Fuentes variación	Por línea		Por sistema radicular	
	F-valor	P-valor	F-valor	P-valor
Época	2.9	0.23	2.9	0.28
Fertilidad	36.4	0.009**	36.4	0.009**
Fertilidad*Época	0.12	0.75	0.12	0.75
Línea	1.86	0.03*	2.14	0.12
Línea*Época	1.59	0.09	3.28	0.04*
Línea*fertilidad	1.55	0.10	4.63	0.01**
Línea*Fert*Época	1.72	0.05*	7.52	0.0007**

* Significativo al 5%

** significativo al 1%

Bajo condiciones de alta fertilidad, en febrero 2007 las dos mejores líneas puras fueron L88-63 y L88-67 con rendimientos de 2464 kg ha⁻¹ y 2445 kg ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 33). Frahm et al (2004) reportó rendimiento de 2576 kg ha⁻¹ para la línea L88-63 bajo condiciones optimas. La mejor combinación de línea fue 50%L88-63 - 50%L88-67 con un rendimiento de 2486 kg ha⁻¹. Cabe señalar que las líneas y/o combinaciones de líneas mencionadas tienen sistema radicular profundo.

Bajo condiciones de alta fertilidad, en enero 2008 la mejor línea pura fue L88-67 (sistema radicular profundo) con un rendimiento de 1789 kg ha⁻¹. Las mejores combinaciones de línea fueron 25%L88-30 - 75%L88-57 y 75%L88-30 - 25%L88-57 ambas con sistema radicular mixto y con rendimientos de 2136 y

2103 kg ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 33). En Honduras Frahm et al. (2004) reportaron rendimiento de 2263 kg ha⁻¹ para la línea L88-30 bajo condiciones optimas.

Bajo condiciones de baja fertilidad, en febrero 2007 la mejor línea pura fue L88-57 (sistema radicular superficial) con un rendimiento de 1518 kg ha⁻¹. La mejor combinación de línea fue 75%L88-30 - 25%L88-57 (sistema radicular mixto) con un rendimiento de 1531 kg ha⁻¹.

Bajo condiciones de baja fertilidad, en enero 2008 las mejores líneas puras fueron L88-67 (sistema radicular profundo) y L88-43 (sistema radicular superficial) con rendimientos de 964 y 814 kg ha⁻¹ respectivamente. La mejor combinación de línea fue 25%L88-14 - 75%L88-43 (sistema radicular superficial) con un rendimiento de 853 kg ha⁻¹ (Cuadro 33).

En la siembra de febrero 2007 se identificaron dos líneas puras (L88-14, L88-57) con rendimientos estadísticamente iguales en los dos tratamientos de fertilidad ambas con sistema radicular superficial. Se identificó también dos combinaciones de líneas con el mismo comportamiento, una con sistema radicular superficial (50%L88-14 - 50%L88-43) y la otra con sistema radicular mixto (75%L88-30 - 25%L88-57).

En la siembra de enero 2008, dos líneas puras L88-57 (sistema radicular superficial) y L88-30 (sistema radicular profundo) tuvieron rendimientos estadísticamente iguales en los dos tratamientos de fertilidad. Dos combinaciones de líneas 75%L88-14 - 25%L88-43 (sistema radicular superficial) y 75%L88-63 - 25%L88-67 (sistema radicular profundo) tuvieron el mismo comportamiento. Beaver et al. (1985) encontraron también líneas de habichuela como BAT 271, 3B-76, 5B-42-2-1 que tuvieron rendimientos iguales tanto bajo condiciones de alta fertilidad como de baja fertilidad.

Cuadro 33: Rendimiento de las líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.

Líneas y/o combinaciones	Febrero 2007		Enero 2008	
	Alta fertilidad	Baja fertilidad	Alta fertilidad	Baja fertilidad
L88-67	2445 a	977 b	1789 a	964 b
L88-63	2464 a	1039 b	1403 a	464 b
L88-57	1893 a	1518 a	947 a	714 a
L88-43	2008 a	1218 b	1700 a	814 b
L88-30	2022 a	968 b	1019 a	761 a
L88-14	1333 a	1004 a	1161 a	478 b
75%L88-63 - 25%L88-67	2139 a	1060 b	764 a	517 a
75%L88-30 - 25%L88-57	1812 a	1531 a	2103 a	717 b
75%L88-14 - 25%L88-43	2080 a	1281 b	894 a	706 a
50%L88-63 - 50%L88-67	2486 a	1097 b	1500 a	483 b
50%L88-30 - 50%L88-57	2043 a	1154 b	1681 a	797 b
50%L88-14 - 50%L88-43	1751 a	1302 a	1667 a	820 b
25%L88-63 - 75%L88-67	2114 a	1097 b	1570 a	842 b
25%L88-30 - 75%L88-57	1851 a	1222 b	2136 a	700 b
25%L88-14 - 75%L88-43	2083 a	1204 b	1722 a	853 b
Promedio	2035	1178	1470	709
CV (%)		29.3		29.3
DMS Tukey .05		839		839

Letras iguales dentro de la misma fila y por época indican no diferencia al 5%.

Alta fertilidad: aplicación de 50 kg/ha de N, P₂O₅, K₂O

Baja fertilidad: no aplicación de fertilizante

En el ensayo de febrero 2007, dos líneas puras y cuatro combinaciones de líneas fueron eficientes bajo condiciones de baja fertilidad y a su vez no respondieron a la aplicación del fertilizante. Las dos líneas puras, todas con sistema radicular superficial, tuvieron eficiencia de uso (EU) de 22 y 26 respectivamente y por cada kg de la suma de N, P₂O₅ y K₂O aplicado tuvieron una producción de grano de 13 y 15 kg respectivamente (valores de eficiencia agronómica (EA) de 13 y 15 (Cuadro 34a). Una de las líneas puras (L88-57) tuvo alto rendimiento. Las cuatro combinaciones de líneas, dos con sistema radicular superficial y dos con sistema radicular mixto tuvieron EU entre 22 y 29 y valores de EA entre 5 y 15 (Cuadro 34a). Una de las combinaciones de líneas (75%L88-30 – 25%L88-57) tuvo alto rendimiento.

Tres líneas puras y seis combinaciones de líneas resultaron ser ineficientes bajo condiciones de bajo disponibilidad de nutrientes y a su vez respondieron a la aplicación del fertilizante. Las tres líneas puras, todas con sistema radicular profundo y las seis combinaciones de líneas, tres con sistema radicular profundo, dos con sistema radicular superficial y uno con sistema radicular mixto tuvieron EU entre 18 y 20, y valores de EA entre 16 y 29 (Cuadro 34b). El bajo rendimiento relativo de estas líneas (entre 40 y 60%) explica su respuesta a la aplicación del fertilizante (Cuadro 34b).

Como se esperaba, las líneas con sistema radicular superficial (4 de 6) tienden a ser eficientes en la adquisición de nutrientes (Figura 23, cuadrante I) mientras que las de sistema radicular profundo (6 de 6) respondieron a la aplicación del nutriente (Figura 1, cuadrante IV). El 67% de las líneas con sistema radicular mixto fueron eficientes en la adquisición de nutrientes (Figura 23, cuadrante I) y 33% respondieron a la aplicación del fertilizante (Figura 23, cuadrante IV). Los resultados obtenidos para la EA en las líneas puras según el método del balance respaldan los obtenidos por el método de la diferencia en cuanto a respuesta. Las líneas con sistema radicular profundo (L88-67, L88-63) tuvieron mayores valores de EA que las líneas con sistema radicular superficial (L88-57, L88-14) es decir respondieron más a la aplicación del fertilizante (Cuadro 35).

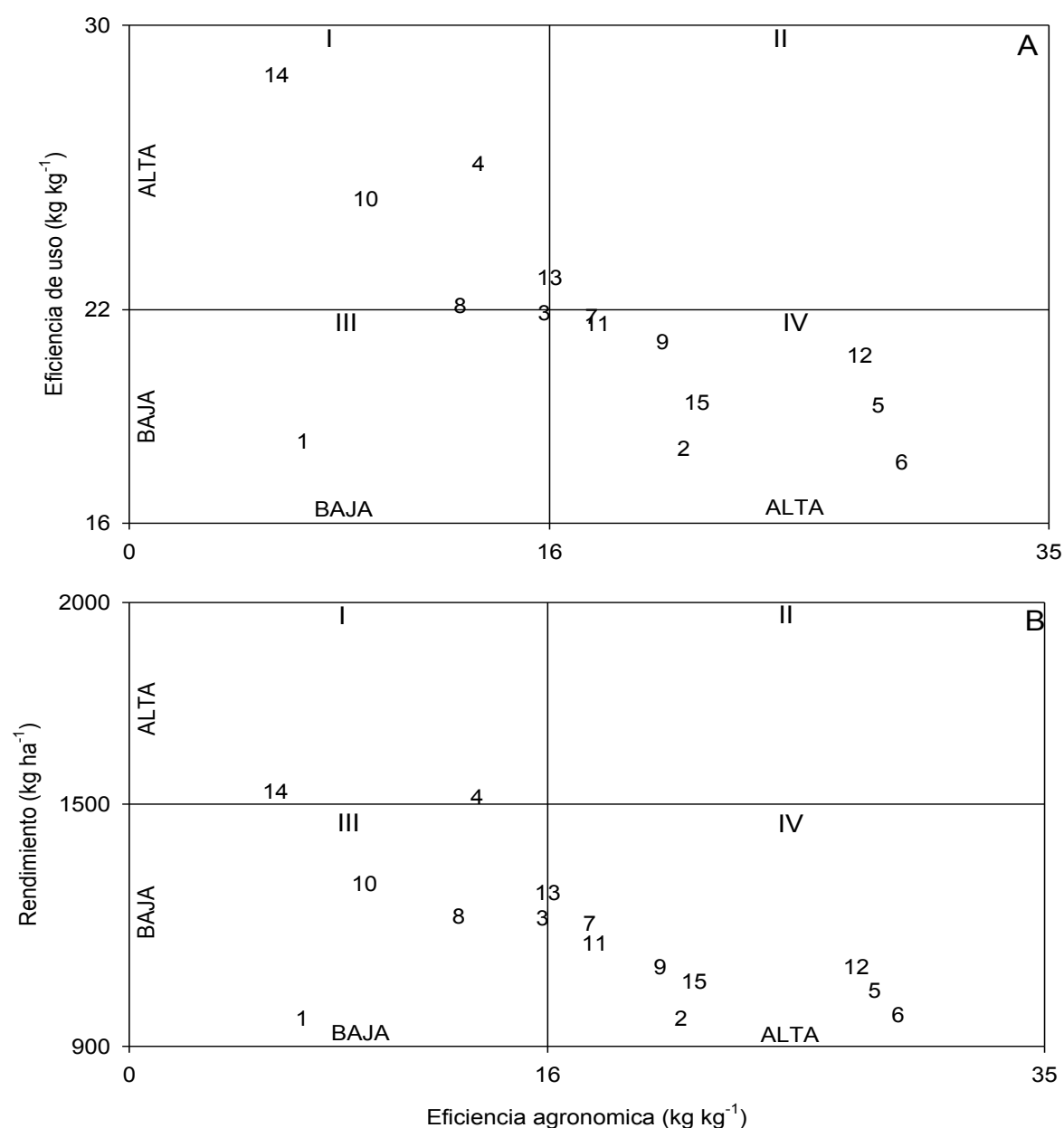
Cuadro 34: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

Línea	Eficiencia agronómica ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia de uso ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento Relativo ³ (%)	Sistema radicular
a) Eficientes no respondedoras				
75%L88-30 - 25%L88-57	5.6	28.6	91.4	Mixto
50%L88-14 - 50%L88-43	9.0	25.1	97.7	Superficial
25%L88-30 - 75%L88-57	12.6	22.1	70.4	Mixto
L88-57	13.3	26.1	67.3	Superficial
L88-43	15.8	21.9	64.4	Superficial
75%L88-14 - 25%L88-43	16.0	22.9	64.2	Superficial
Promedio	12.1	24.4	75.9	
b) Ineficientes, respondedoras				
25%L88-14 - 75%L88-43	17.6	21.8	56.6	Superficial
50%L88-30 - 50%L88-57	17.8	21.6	55.3	Mixto
25%L88-63 - 75%L88-67	20.3	21.1	54.7	Profundo
L88-30	21.1	18.1	47.2	Profundo
75%L88-63 - 25%L88-67	21.6	19.4	52.2	Profundo
50%L88-63 - 50%L88-67	27.8	20.7	44.1	Profundo
L88-63	28.5	19.3	43.3	Profundo
L88-67	29.4	17.7	41.8	Profundo
Promedio	23.0	20.0	49.4	
b) Ineficientes, no respondedoras				
L88-14	6.6	18.3	84.3	Superficial
1: Eficiencia agronómica >16: respondedor		eficiencia agronómica <16: no respondedor		
2: Eficiencia de uso >22: eficiente		eficiencia de uso <22: ineficiente		
3: Rendimiento relativo >60%: Alto		Rendimiento relativo <60%: Bajo		

Cuadro 35: Eficiencia agronómica según el método de la diferencia para las líneas puras en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Eficiencia agronómica* (kg kg ⁻¹)	Sistema radicular
L88-67	34.7	Profundo
L88-63	33.4	Profundo
L88-43	31.9	Superficial
L88-30	29.5	Profundo
L88-57	28.4	Superficial
L88-14	26.4	Superficial

*Calculado según el método del balance



1	L88-14	6	L88-67	11	50%L88-30 - 50%L88-57
2	L88-30	7	25%L88-14 - 75%L88-43	12	50%L88-63 - 50%L88-67
3	L88-43	8	25%L88-30 - 75%L88-57	13	75%L88-14 - 25%L88-43
4	L88-57	9	25%L88-63 - 75%L88-67	14	75%L88-30 - 25%L88-57
5	L88-63	10	50%L88-14 - 50%L88-43	15	75%L88-63 - 25%L88-67

Figura 23: Características de cada línea en cuanto a eficiencia y rendimiento bajo condiciones de baja fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

En enero 2008, dos líneas puras una con sistema radicular superficial y otra con sistema radicular profundo y cuatro combinaciones de líneas: dos con sistema radicular superficial, una con sistema radicular mixto y otra con sistema radicular superficial fueron eficientes y a su vez respondieron a la aplicación del fertilizante (Cuadro 36a). Estas seis líneas y/o combinaciones tuvieron valores de EU entre 25 y 30 y valores de EA entre 16 y 18 (Cuadro 36a). Tuvieron rendimientos relativos entre 48 y 54%.

Una línea pura con sistema radicular profundo fue eficiente bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes y no respondió a la aplicación del fertilizante. Esta línea tuvo valores de EU y de EA de 23 y 5 respectivamente (Cuadro 36b).

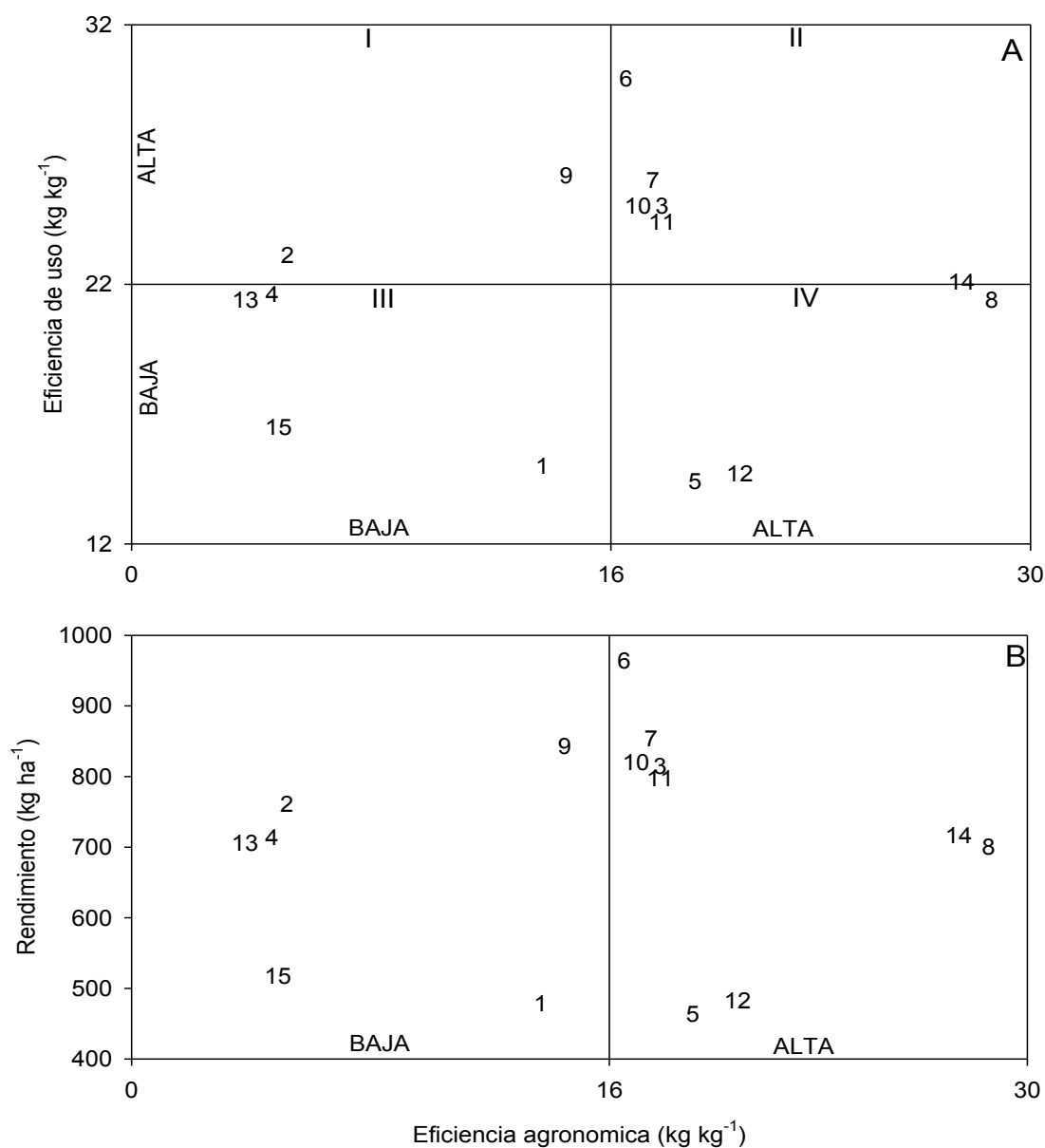
Una línea pura con sistema radicular profundo y tres combinaciones de líneas, dos con sistema radicular mixto y una con sistema radicular profundo fueron ineficientes bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes y a su vez respondieron a la aplicación del fertilizante. Estas cuatro líneas y/o combinaciones tuvieron valores de EU entre 14 y 20 y valores de EA mayores de 16 (Cuadro 36c).

Dos líneas pura y dos combinaciones de línea, todas con sistema radicular superficial fueron ineficientes y no respondieron a la aplicación del fertilizante. Estas cuatro líneas y/o combinaciones tuvieron EU entre 15 y 20 y valores de EA alrededor de 14 (Cuadro 36d).

En la siembra de enero 2008, los resultados no fueron como se esperaba. 50% de las líneas con sistema radicular superficial (Figura 24A, cuadrante II) y 50% con sistema radicular profundo (Figura 24A, cuadrante I y II) fueron eficientes en la adquisición de nutrientes. 50% de las líneas con sistema radicular superficial (Figura 24A, cuadrante II), 67% con sistema radicular profundo (Figura 24A, cuadrante II y IV) y 100% con sistema radicular mixto (Figura 24A, cuadrante II y IV) respondieron a la aplicación del fertilizante.

Cuadro 36: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por líneas y/o combinaciones de líneas en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, enero 2008.

Líneas y/o combinaciones	Eficiencia Agronómica ¹ (kg kg ⁻¹)	Eficiencia de uso ² (kg kg ⁻¹)	Rendimiento Relativo ³ (%)	Sistema radicular
a) Eficientes, respondedoras				
L88-67	16.5	29.9	53.9	Profundo
25%L88-14 – 75%L88-43	17.4	26.0	50.8	Superficial
L88-43	17.7	25.0	48.1	Superficial
50%L88-14 – 50%L88-43	16.9	25.0	53.6	Superficial
25%L88-63 – 75%L88-67	14.5	26.2	55.2	Profundo
50%L88-30 – 50%L88-57	17.7	24.4	49.0	Mixto
Promedio	16.8	26.1	51.8	
b) Eficientes, no respondedoras				
L88-30	5.2	23.1	76.3	Profundo
c) Ineficientes, respondedoras				
L88-63	18.8	14.4	33.3	Profundo
50%L88-63 – 50%L88-67	20.3	14.7	32.2	Profundo
75%L88-30 – 25%L88-57	27.7	22.1	34.3	Mixto
25%L88-30 – 75%L88-57	28.7	21.4	32.9	Mixto
Promedio	23.9	18.2	33.2	
c) Ineficientes, no respondedoras				
L88-57	4.7	21.6	81.6	Superficial
L88-14	13.7	15.0	43.1	Superficial
75%L88-14 – 25%L88-43	3.8	21.4	79.1	Superficial
75%L88-63 – 25%L88-67	4.9	16.5	73.4	Profundo
Promedio	6.8	18.6	69.3	
1: Eficiencia agronómica >16: respondedor		eficiencia agronómica <16: no respondedor		
2: Eficiencia de uso >22: eficiente		eficiencia de uso <22: ineficiente		
3: Rendimiento relativo >60%: Alto		Rendimiento relativo <60%: Bajo		



1	L88-14	6	L88-67	11	50%L88-30 - 50%L88-57
2	L88-30	7	25%L88-14 - 75%L88-43	12	50%L88-63 - 50%L88-67
3	L88-43	8	25%L88-30 - 75%L88-57	13	75%L88-14 - 25%L88-43
4	L88-57	9	25%L88-63 - 75%L88-67	14	75%L88-30 - 25%L88-57
5	L88-63	10	50%L88-14 - 50%L88-43	15	75%L88-63 - 25%L88-67

Figura 24: Características de cada línea en cuanto a eficiencia y rendimiento bajo condiciones de baja fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, enero 2008.

Se observaron relaciones lineales positivas entre rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo y eficiencia agronómica tanto para febrero 2007 ($R^2=0.86$, $p<0.01$) como para enero 2008 ($R^2=0.87$, $p<0.01$) (Figura 25) lo que indicó que las líneas con mayores rendimientos en el tratamiento de fertilidad completo fueron las que respondieron más a la aplicación de N y de P. Para cada aumento de una unidad de EA hubo un aumento de rendimiento en el tratamiento de fertilidad completo de 37 kg para febrero 2007 y 51 kg para enero 2008 respectivamente, lo que sugiere que las líneas y/o combinaciones de líneas respondieron mas a la aplicación de $N-P_2O_5-K_2O$ en enero 2008 que en febrero 2007 ya que el rendimiento aumenta con la EA a una mayor magnitud en enero 2008.

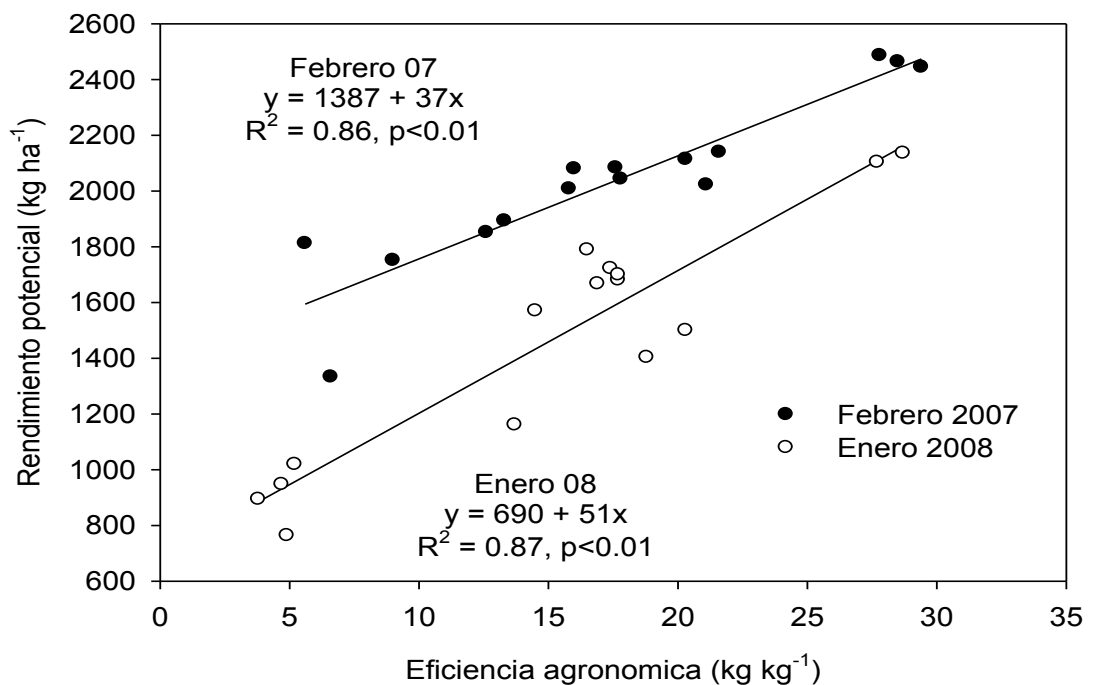


Figura 25: Relación entre rendimiento en grano (tratamiento de fertilidad completo) y eficiencia agronómica en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.

Se observó relaciones cuadráticas negativas entre la eficiencia agronómica y rendimiento relativo tanto en febrero 2007 como en enero 2008, lo que sugiere que las líneas con mayores rendimientos relativos tuvieron menos respuesta a la aplicación de N-P₂O₅-K₂O que las líneas ineficientes (Figura 26). El rendimiento relativo disminuye y la eficiencia agronómica aumenta hasta un valor de 37 para febrero 2007 y enero 2008 respectivamente, lo que sugiere que la mayor respuesta que se obtuvo para el N-P₂O₅-K₂O fue de 37 kg de grano por cada kg de nutrientes (suma de N + P₂O₅) que se aplicó.

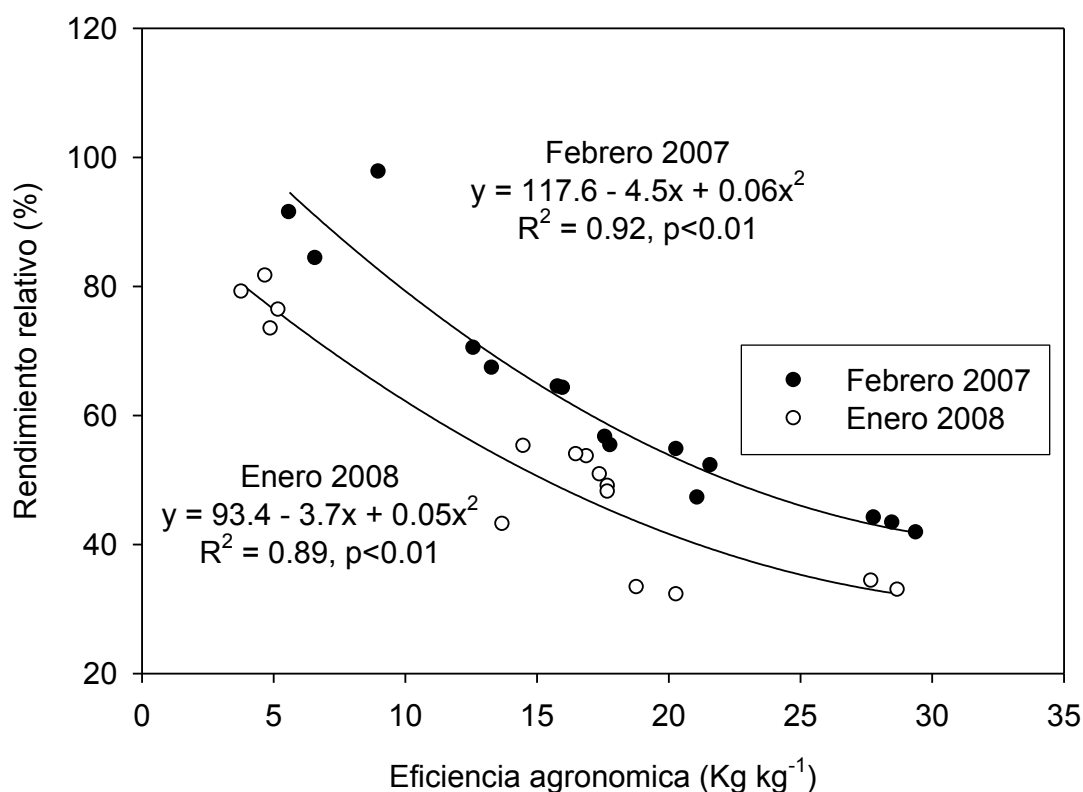


Figura 26: Relación entre rendimiento relativo y eficiencia agronómica en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007 y enero 2008.

5.4.1.2 Por sistema radicular

Los rendimientos promedios obtenidos por sistema radicular y fertilidad se presentan en el Cuadro 37. Bajo condiciones de alta fertilidad, en febrero 2007 el sistema radicular profundo fue el mejor con un rendimiento de 2278 kg ha⁻¹ mientras que en enero 2008 el mejor sistema radicular fue el mixto con 1973 kg ha⁻¹ (Cuadro 37).

Bajo condiciones de baja disponibilidad de nutrientes no hubo diferencia significativa entre los tres sistemas radiculares tanto en febrero 2007 como en enero 2008. Cabe notar que los sistemas radiculares superficial y mixto tuvieron rendimientos ligeramente superiores tanto en febrero 2007 (1254 y 1302 kg ha⁻¹, respectivamente) como en enero 2008 (731 y 738 kg ha⁻¹, respectivamente), que el sistema radicular profundo (Cuadro 37).

Estos resultados fueron similares a los encontrados por Melissa et al. (2005) donde evaluaron bajo condiciones de campo, cuatro genotipos de habichuela: dos con sistema radicular superficial (L88-43 y L88-57) y otros dos con sistema radicular profundo (L88-30 y L88-63) bajo dos niveles de P. Estos investigadores reportaron que los genotipos con sistema radicular profundo tuvieron mayores rendimientos bajo condiciones de alto P, mientras que los que tenían sistema radicular superficial tuvieron mayores rendimientos bajo condiciones de estrés de P.

Melissa et al. (2005) encontraron también resultados similares en un experimento de invernadero donde evaluaron tres líneas de habichuela: uno con sistema radicular superficial (G19833), otro con sistema radicular profundo (DOR 364) y el último con sistema radicular mixto (BAT 477). La línea con sistema radicular mixto tuvo mayor biomasa vegetativa tanto en alto como en bajo P, mientras que la línea con sistema radicular superficial tuvo mayor biomasa que la con sistema radicular profundo bajo condiciones de bajo P.

Cuadro 37: Rendimiento por tipo de raíz y por régimen de fertilización en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, Febrero 2007 y Enero 2008.

Sistema radicular	febrero 2007		enero 2008	
	Alta fertilidad	Baja fertilidad	Alta fertilidad	Baja fertilidad
Superficial	1858b	1254a	1349b	731a
Mixto	1902b	1302a	1973a	738a
Profundo	2278a	1040a	1341b	672a
Medias	2013	1199	1554	714
CV (%)	30		30	

Letras iguales dentro de la misma columna indican no diferencia al 5%.

Alta fertilidad: aplicación de 50 kg/ha de N, P₂O₅, K₂O

Baja fertilidad: no aplicación de fertilizante

En febrero 2007, los sistemas radiculares superficial y mixto fueron eficientes con EU de 23 y 24 respectivamente mientras que tuvieron una respuesta minima a la aplicación del fertilizante con EA de 13 y 12 respectivamente (Cuadro 38). El sistema radicular profundo fue ineficiente con una EU menor de 20 pero respondió a la aplicación del fertilizante con una EA de 25 lo que explica también el bajo valor del rendimiento relativo (47%) (Cuadro 6). Estos resultados confirman los obtenidos en el análisis por línea en donde las líneas con sistema radicular superficial y mixto tienden a ser eficientes mientras que las líneas con sistema radicular profundo respondieron a la aplicación del fertilizante.

Cuadro 38: Eficiencia agronómica, eficiencia de uso y rendimiento relativo por sistema radicular en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela.

Sistema radicular	Eficiencia agronómica	Eficiencia de uso	Rendimiento relativo	características
	kg kg-1		%	
	Febrero 2007			
Superficial	13.1	22.7	72.4	E, NR
Mixto	12.0	24.1	72.4	E, NR
Profundo	24.8	19.4	47.2	I, R
	Enero 2008			
Superficial	12.4	22.3	59.4	E, NR
Mixto	24.7	22.6	38.7	E, R
Profundo	13.4	20.8	54.0	E, NR

E = eficiente

R = respondedor

I = ineficiente

NR = no respondedor

5.4.2 Concentración de nutrientes en las hojas

Para la concentración de nutrientes en el tejido, se encontró diferencia significativa para la interacción sistema radicular/fertilidad para nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, zinc, cobre y boro (Cuadro 39). Lo que significa que la concentración de estos nutrientes en las hojas de la habichuela varía con la fertilidad dependiendo del sistema radicular.

Cuadro 39: Análisis de varianza para concentración de nutrientes en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

Nutriente	Sistema radicular		Fertilidad		Sist rad * fertilidad		CV (%)
	CM	p-valor	CM	p-valor	CM	p-valor	
Nitrógeno	0.08	0.66	1.98	0.26	3.21	0.01**	16.4
Fósforo	9.2x10 ⁻⁴	0.55	0.01	0.20	0.02	0.007**	13.2
Potasio	0.07	0.39	0.06	0.73	0.48	0.03*	13.3
Azufre	2.5x10 ⁻⁵	0.88	0.02	0.12	0.01	0.02*	11.1
Calcio	1.1x10 ⁻⁵	0.98	0.12	0.36	1.3 x10 ⁻³	0.83	16.7
Magnesio	1.8x10 ⁻⁴	0.71	0.01	0.28	1.9 x10 ⁻³	0.23	14.6
Manganeso	413	0.18	1907	0.22	659	0.09	20.9
Hierro	1219	0.34	146702	0.02*	297	0.52	23.9
Cobre	93	0.02*	128	0.09	81	0.02*	30.3
Zinc	32	0.22	121	0.13	107	0.03*	17.9
Boro	2.2	0.63	12.2	0.37	103	0.003*	11.2

*significativo al 5%

**significativo al 1%

CV = coeficiente de variación CM = Cuadrado medio

Cuadro 40: Concentración de nutrientes por sistema radicular y por fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

Nutriente	Baja fertilidad			Alta fertilidad		
	Superficial	Profundo	Significancia	Superficial	Profundo	Significancia
Fósforo, %	0.36	0.32	0.05*	0.32	0.40	0.02*
Nitrógeno, %	4.08	3.39	0.03*	3.95	4.45	0.11
Potasio, %	2.24	2.10	0.30	2.09	2.41	0.03*
Azufre, %	0.25	0.23	0.05*	0.27	0.29	0.05*
Zinc, mg kg ⁻¹	24.2	22.7	0.47	24.4	29.8	0.02*
Cobre, mg kg ⁻¹	10.9	11.1	0.90	11.7	17.2	0.002**
Boro, mg kg ⁻¹	29.8	25.9	0.01**	27.6	30.4	0.06

*significativo al 5%

**significativo al 1%

Bajo condiciones de baja fertilidad, las líneas con sistema radicular superficial tuvieron mayores concentraciones de P (0.36%), de N (4.08%), de S (0.25%) y de B (29.8 mg kg⁻¹) que las líneas con sistema radicular profundo (Cuadro 40).

Bajo condiciones de alta fertilidad, las líneas con sistema radicular profundo tuvieron mayores concentración de P (0.4%), de K (2.41%), de S (0.29%), de Zn (29.8 mg kg⁻¹) y de Cu (17.2 mg kg⁻¹) que las líneas con sistema radicular superficial (Cuadro 40).

Melissa et al. (2005) encontraron que bajo condiciones de alto P, la línea con sistema radicular profundo DOR364 tuvo mayor concentración de P que la línea con sistema radicular superficial G19833, mientras que bajo condiciones de estrés de P ocurrió lo contrario, G19833 tuvo mayor concentración de P que DOR 364. Liao et al. (2001) reportaron también que bajo condiciones de baja disponibilidad de P, la línea eficiente G19839 tuvo mayor concentración de P que la línea ineficiente DOR 364.

Estos resultados sirven para entender los factores que afectan los rendimientos obtenidos en las diferentes líneas. Bajo condiciones de alta fertilidad las líneas con sistema radicular profundo tienen mayor concentración de algunos nutrientes que bajo condiciones de baja fertilidad. Bajo condiciones de baja fertilidad, las líneas con sistema radicular superficial son capaces de aumentar la concentración de nutrientes debido a una mayor concentración de la masa radicular en las capas superficiales del suelo.

5.4.3 Relaciones entre rendimiento y concentración de nutrientes en las hojas

Bajo condiciones de alta fertilidad se encontraron relaciones lineales positivas entre rendimiento en grano y concentración de nitrógeno (N), de fósforo (P), de potasio (K), de azufre (S), de zinc (Zn), de cobre (Cu), de magnesio (Mg) y de manganeso (Mn) (Cuadro 41). La concentración de N, de P, de K, de S, de Zn, de Cu, de Mg y de Mn en las hojas varió de 2.4% a 5.1%, de 0.24% a 0.45%, 1.2% a 2.7%, de 0.19% a 0.35%, de 14 mg kg⁻¹ a 36 mg kg⁻¹, de 6 mg kg⁻¹ a 26 mg kg⁻¹, de 0.13% a 0.30%, de 29 mg kg⁻¹ a 123 mg kg⁻¹, respectivamente. Por cada aumento de 1% de la concentración de N y de K en el tejido, el rendimiento

aumentó de 611 kg ha⁻¹ y 1141 kg ha⁻¹, respectivamente. Por cada aumento de 0.1% de la concentración de P, S y Mg en el tejido el rendimiento aumenta de 821 kg ha⁻¹, 1284 kg ha⁻¹ y 1030 kg ha⁻¹, respectivamente. Por cada aumento de 1 mg kg⁻¹ de la concentración de Zn, Cu y Mn el rendimiento aumenta de 72 kg ha⁻¹, 91 kg ha⁻¹ y 24 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 41). Bajo condiciones de baja fertilidad, no se encontraron relaciones entre rendimiento y ningún nutriente. Araujo et al. (2003) reportaron también relaciones positivas entre rendimiento y concentración de N (r=0.88, p<0.001) y concentración de P (r=0.71, p<0.001) en 11 líneas de habichuela fertilizadas con 25 kg N ha⁻¹, 40 kg P ha⁻¹ y 40 kg K ha⁻¹.

Cuadro 41: Relaciones lineales entre rendimiento y concentraciones de nutrientes en las hojas bajo condiciones de alta fertilidad en el experimento de adaptación de líneas de habichuela con sistema radicular conocido, Isabela, febrero 2007.

Nutriente	Ecuación	R ²	p-valor
Nitrógeno, %	Y = -694 + 611x	0.55	0.0004
Fósforo, %	Y = -1208 + 8214x	0.57	0.0003
Potasio, %	Y = -696 + 1141x	0.50	0.0014
Azufre, %	Y = -1728 + 12836x	0.76	<0.0001
Zinc, mg kg ⁻¹	Y = 183 + 72x	0.59	0.0005
Cobre, mg kg ⁻¹	Y = 467 + 91x	0.63	0.0001
Magnesio, %	Y = -742 + 10302x	0.55	0.0004
Manganeso, mg kg ⁻¹	Y = -165 + 24x	0.77	<0.0001

6. Conclusiones y recomendaciones.

En este estudio se buscaron identificar genotipos de habichuela eficientes en la adquisición de N y de P con cuatro experimentos. El experimento 1 consistió esencialmente en la selección de las mejores líneas dentro de un grupo de 228 líneas mayoritariamente de grano rojo y negro provenientes de Centro America. En el experimento 2 se identificó mediante dos ensayos, dentro de las líneas seleccionadas en el experimento 1, las líneas eficientes en la adquisición de N y de P. En el experimento 3 se tipificó la arquitectura del sistema radicular de las tres mejores líneas del experimento 2 así que de los dos testigos (Morales y Salagnac 90). En el experimento 4 se estudió la adaptación de quince líneas de habichuela de grano negro y de sistema radicular conocido bajo dos niveles de disponibilidad de nutrientes en dos ensayos.

Experimento 1

En el experimento 1 se seleccionó de las 228 líneas evaluadas las 34 mejores que tuvieron la combinación de los mejores rendimientos y mayor niveles de resistencia a la roya.

Experimento 2

En el ensayo 1 del experimento 2 se identificaron:

a) Tres líneas: PR 0443-151, MER 2212-28 e IBC 308-15 eficientes en la adquisición de N y de P y respondedoras a la aplicación de las mismas. Estas tres líneas pueden usarse tanto en suelos deficientes en N y P como en áreas donde se puede fertilizar.

b) Cinco líneas: VAX 3, RBF 19-63, MEN 2201-64, RBF 11-33, RBF 11-29 eficientes en la adquisición de N y de P pero que no respondieron ni a la aplicación de N, ni a la aplicación de P. Estas cinco líneas pueden usarse en suelos deficientes en N y en P y donde no se puede fertilizar.

En el ensayo 2 del experimento 2 se identificaron:

a) Una línea: PR 0443-151 eficiente en la adquisición de N y de P y respondedora a la aplicación de las mismas.

b) Seis líneas: PR 0340-3-3-1, VAX 3, A774, RBF 11-29, RBF 11-33 eficientes en la adquisición de N y de P pero que no respondieron a la aplicación de las mismas.

Al nivel de los dos ensayos de este experimento, tres líneas (VAX 3, PR 0340-3-3-1, A774) tuvieron una adaptabilidad de 100%. Estas tres líneas tuvieron rendimientos por encima del rendimiento promedio general de las 36 líneas evaluadas en todos los ambientes. Otras dos líneas (PR 0443-151, IBC 309-23) tuvieron una adaptabilidad de 86%. Estas dos líneas tuvieron rendimientos por encima del rendimiento promedio general en seis de los siete ambientes evaluados.

Experimento 3.

La línea VAX 3, eficiente en la adquisición de N y de P pero no respondedora a la aplicación de las mismas, tuvo mayor peso seco de raíz y razón peso seco raíz: vástago en los tratamientos de fertilidad menos N y menos P comparado con el tratamiento completo. Bajo condiciones de baja disponibilidad de N y de P VAX 3 tuvo un sistema radicular superficial al aumentar la producción de raíces en la capa superficial del suelo (<15 cm).

La línea PR 0443-151, eficiente en la adquisición de N y de P y respondedora a la aplicación de las mismas, tuvo peso seco radicular y razón peso seco raíz: vástago iguales en los tres tratamientos de fertilidad. Bajo condiciones de baja disponibilidad de N tuvo un sistema radicular intermedio al aumentar la producción de raíces en la capa superficial (<15 cm) e intermedia (15-30 cm) del suelo. Bajo condiciones de baja disponibilidad de P, tuvo un sistema radicular superficial al aumentar la producción de raíces en la capa superficial (<15 cm) del suelo.

La línea SER 16, ineficiente en la adquisición de N y de P pero respondedora a la aplicación de las mismas, tuvo peso seco radicular y razón peso seco raíz: vástago iguales en los tres tratamientos de fertilidad. Bajo condiciones de baja disponibilidad de N, tuvo un sistema radicular intermedio al aumentar la producción de raíces en la capa intermedia del suelo (15-30 cm), mientras que

bajo condiciones de baja disponibilidad de P tuvo un sistema radicular profundo al aumentar la producción de raíces en la capa profunda (>30 cm) del suelo.

Experimento 4

En el ensayo 1 del experimento 4, bajo condiciones de alta fertilidad las mejores líneas puras fueron L88-63 y L88-67, ambas con sistema radicular profundo. La mejor combinación de línea fue 50%L88-63 – 50%L88-67 con sistema radicular profundo. Bajo condiciones de baja fertilidad, la mejor línea pura fue L88-57 con sistema radicular superficial y la mejor combinación de línea fue 25%L88-30 – 75%L88-57 con sistema radicular mixto.

En el ensayo 2 del experimento 4, bajo condiciones de alta fertilidad la mejor línea pura fue L88-67 con sistema radicular profundo y la mejor combinación fue 25%L88-30 – 75%L88-57 con sistema radicular mixto. Bajo condiciones de baja fertilidad, la mejor línea pura fue L88-43 con sistema radicular superficial y la mejor combinación fue 25%L88-14 – 75%L88-43 con sistema radicular superficial.

En este experimento se encontraron, de manera general, que las líneas con sistema radicular superficial fueron eficientes en la adquisición de nutrientes porque bajo condiciones de baja fertilidad tuvieron en el tejido mayor concentración de P, de N, de S y de B que las líneas con sistema radicular profundo. Las líneas con sistema radicular profundo respondieron a la aplicación de fertilizantes, pues bajo condiciones de alta fertilidad tuvieron en el tejido mayor concentración de P, de K, de S, de Zn y de Cu que las líneas con sistema radicular superficial. Las líneas con sistema radicular mixto tienden a ser eficientes y respondedoras.

Entonces, bajo condiciones de baja fertilidad se recomienda la siembra de una línea con sistema radicular superficial, mientras que bajo condiciones de alta fertilidad se recomienda sembrar líneas de habichuela con sistema radicular profundo. Una línea con sistema radicular mixto tiene la capacidad de adaptarse a ambas condiciones de fertilidad.

7. Literatura Citada

- Abruña-Rodríguez, F., G. Rodríguez y J. B. Feliciano. 1982. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico. VII. Dry beans. J. Agric Univ Puerto Rico 61: 429-437.
- Amberger, A. 2006. Soil fertility and plant nutrition in the tropics and subtropics. [en línea].
Disponble en http://www.ipipotash.org/udocs/2006_IFA_IPI_Soil_Fertility.pdf (Verificado 20 august 2007). IFA (International Fertilizer Industry Association) and IPI (International Potash Institute), Paris, France, 1st edition.
- Araujo, P. A., A. M. Fernandes, F. Y. Kubota, F. C. Brasil y M. G. Teixeira. 2004. Sample size for measurement of root traits on common bean by image análisis. Pesq. Agropec. Bras. 35(4): (809-817).
- Araujo, P. A., M. G. Teixeira. 2003. Nitrogen and phosphorus Harvest indices of common bean cultivars: implications for yield quantity and quality. Plant and Soil 257: 425-433.
- Araujo, P. A., G. T., Marcelo y L. Dejair. 2000. Growth and yield of common bean cultivars at two soil phosphorus levels under biological nitrogen fixation [en línea]. Disponible en <http://www.scielo.br/pdf/pab/v35n4/4748.pdf> (Verificado 20 august 2007) Pesq. Agropec. Bras. 39(4), pp 313-318.
- Baligar, V.C., N. K. Fageria, Z. L. He. 2001. Nutrient use efficiency in plants. Commun. Soil Sci. Plant. Anal. 32: 921-950.
- Beaver, J. S., T. G. Porch, M. Zapata. 2008. Registration of 'Verano' White bean. Journal of Plant Registration. 2(3):187-189.
- Beaver, J. S. 2006. Conjunto tecnológico de la habichuela [en línea]. Disponible en http://academic.uprm.edu/jbeaver/index_files/CTBean/Outline%20.pdf (verificado 20 august 2006).
- Beaver, J. S., y N. Miklas. 1999. Registration of Morales small white bean. Crop Sci. 34: 12-57.

- Beaver, J. S., C. V. Paniagua, D. P. Coyne, G. F. Freytag. 1985. Yield stability of dry bean genotypes in the Dominican Republic. *Crop Science* 25: 923-926.
- Beebe, S.E, M. Rojas-Pierce, X., Yan, M. W., Blair, F., Pedraza, F., Munoz, J., Tohme, J. P. Lynch. 2006. Quantitative trait loci for root architecture traits correlated with P acquisition in common bean [en línea]. Disponible en <http://crop.sciijournals.org/cgi/reprint/46/1/413> (verificado 20 august 2007). *Crop Sci.* 46 : 413-423.
- Black, C. A. 1995. Methods of soil analysis. *Agronomy #9 part two*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA, pp1178.
- Bolanos, A. y L., Segura. 1991. Aspectos técnicos sobre 45 cultivos agrícolas de Costa Rica. Ministry of Agriculture and Livestock, Vegetable Program, Regional Office for Greece, San Jose, Costa Rica.
- Bonser, A. M., J. Lynch and S. Snapp. 1996. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist* 132:281-288.
- Bouma, T. J., K. L. Nielsen y B. Koutstaal. 2000. Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. *Plant and Soil* 218: 185-196.
- Broughton, J. W., G., Hernandez, M., Blair, S., Beebe, P., Gepts, J Vanderleyden. 2003. Beans (*Phaseolus* spp) – Model food legumes. *Plant and Soil* 252: 55-128.
- Clermont-Dauphin, C., J. M., Meynard, Y. M., Cabidoche. 2003. Devising fertilizer recommendations for diverse cropping systems in a region: The case of low input bean/maize intercropping in a tropical highland of Haiti. *Agronomie* 23: 673-681.
- Crespo, G. M., R. Kluson, E. C. Schroder. 1987. Nitrogen levels and Rhizobium inoculation and yields of native white beans (*Phaseolus vulgaris*). *J. Agric. Univ. Puerto Rico*. 71: 1-6.
- Del Valle, R. J., T. W. Scott, M. A. Lugo-López. 1981. Variable response of food crops to banded and broadcast residual fertilizer P on an ultisol. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*. 65: 171-189.

- Dos Santos, A. B., N. K. Fageria, 2007. Nitrogen fertilizar Management for efficient use by dry bean in tropical lowland. *Pesq. Agropc. Bras.* 42 (9): 1237-1248.
- Duran, L. A., M. W., Blair, M. C., Giraldo, R., Macchiavelli, E., Prophete, J. C., Nin, J. S., Beaver. 2005. Morphological and molecular characterization of common bean landraces and cultivars from the Caribbean. *Crop Sci.* 45: 1320-1328.
- Epstein, E., A. J. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachussets. 2nd edition. 422 p
- Fageria, N. K., M. P. B. Filho. 2007. Dry-matter and grain yield, nutrient uptake and phosphorus use-efficiency of lowland rice as influenced by phosphorus fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 1289-1297.
- Fageria, N.K. y V. V. Baligar. 2004. Properties of termite Mound soils and responses of rice and bean to nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on such soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 2097 – 2109.
- Fageria, N. K., R. J. Wright, V. C. Baligar and J. R. P. Carvalho. 1991. Response of upland rice and common bean to liming on an Oxisol. P. 519-525. In R. J. Wright, V. C. Baligar and R. P. Murrman (ed.) *plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations. 2005. FAOSTAT Agriculture Data. <http://www.fao.org>. Statistics (FAOSTAT).
- Food and Agricultural Organization (FAO). 2002. Los fertilizantes y su uso, una guia de bolsillo para los oficiales de extension. Asociacion Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA). Roma, Italia. 77 p.
- Food and Agricultural Organization (FAO). 2008. Cropwater management: bean [en linea] disponible en <http://www.fao.org/ag/aql/aglw/cropwater/bean.stm> (verificado 9 noviembre 2008)

- Forde, B., H. Lorenzo, 2001. The nutritional control of root development. *Plant and Soil* 232: 51-68.
- Frahm, M. A., J. C. Rosas, N. Mayek-Pérez, E. López-Salinas, J. A. Gallegos, J. D. Kelly. 2004. Breeding beans for resistance to terminal drought in the lowland tropics. *Euphytica* 136: 223-232.
- Ge, Z. Y., G. Rubio and J. P. Lynch. 2000. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorous acquisition efficiency: Results from a geometric simulation model. *Plant and Soil* 218, 159-171.
- Gierbolini, E. R. 1975. Soil survey of Mayagüez area of Western Puerto Rico. United States Department of Agriculture – Soil Conservation Services, Washington D. C. 20250.
- Groupe de Recherche et d'Echange Technologique (GRET). 1991. Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture haïtienne. Imprimerie Tardy Quercy, France, 490 p.
- Hall, R. 1991. The bean plant, p 1-5 in R. Hall (ed.) compendium of bean diseases. APS Press, Saint Paul, Minnesota.
- Hardarson, G., S. K. A. Danso. 1993. Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* 152: 19-23.
- Henson, R. A. 1993. Measurements of N₂ fixation by common bean in central Brazil as affected by different reference crops. *Plant and soil* 152: 53-58.
- Hernandez, L. 2006. Common bean (*Phaseolus vulgaris*) responses to phosphorus limitation. In bean workshop: cultivation of common bean in low input system [CD-ROM]. CIAT, Cali, Colombia.
- Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237: 173-195.
- Hungria, M., R. J., Campo, I. C, Mendes. 2003. Benefits of inoculation of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop with efficient and competitive rhizobium tropici strains. *Biol. Fertil. Soils* 39: 88-93.
- InfoStat. 2007. InfoStat versión estudiantil 2007.3. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Junta de Planificacion, 2006. Plan de uso de terrenos de Puerto Rico, perfil regional – Region Oeste.
<http://jpops02.jp.gobierno.pr/pls/portal/docs/PAGE/PAGINASINICIO/PUTPR/DOCANEJ/REGI%D3N%20OESTE%20FINAL.PDF>
- Kimani, J. M., P. Tongoona. 2008. The mechanism of genetic control for low soil nitrogen (N) tolerance in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica* 162: 193-203.
- Kimani, J. M., P. M. Kimani, S. M. Githiri, J. W. Kimenju. 2007. Mode of inheritance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) traits for tolerance to low soil P. *Euphytica* 155: 225 – 234.
- Kochian, L. 2000. Molecular physiology of mineral nutrient acquisition, transport and utilization. p 1204-1247 in Buchanan, B., W. Gruissem, R. Jones (Eds) *Biochemistry and molecular biology of plants*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, Maryland 20855-2768, USA.
- Liao, H., G. Rubio, X. Yan, A. Cao, K. M. Brown, J. P. Lynch. 2001. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant and Soil* 232: 69-79.
- Liu, G., J. Dunlop, T. Phung, Y. Li. 2007. Physiological responses of wheat phosphorus-efficient and inefficient genotypes in field and effects of mixing other nutrients on mobilization of insoluble phosphates in hydroponics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 2239-2256.
- Loboski, C. A. M. J. E. Sawyer, D. T. Walters, L. G. Bundy, R. G. Hoeft, G. W. Randall, T. W. Andraski. 2008. Evaluation of the Illinois soil nitrogen test in the north central region of the United States. *Agronomy Journal* 100: 1070-1076.
- Lorente, J. 1997. Suelos, abonos y material orgánica. Biblioteca de la agricultura, editorial Alfa-Omega, Barcelona, España.
- Lugo-López, M. A., J. Badillo-Feliciano, L. Caldach. 1977. Response of native White beans (*Phaseolus vulgaris*) to various N level in an oxisol. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*. 61: 438-441.

- Lynch, J. P. 2007. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55: 493-512.
- Lynch, J. P. 2005. Root architecture and nutrient acquisition. *Ecological studies* 181: 147-183.
- Lynch, J. P., H. P., Graham, J. C., Rosas, R. A. Villalobos. 2003. Genetic improvement of bean adaptation to low fertility soil. Bean/cowpea five year workplan [en línea]. Disponible en <http://www.isp.msu.edu/crsp/Volume%20II/LAC%20Region/LAC4.pdf> (verificado 24 february 2007; verificado 17 august 2007)
- Lynch, J. P. y K. M., Brown. 2006. Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorous availability. *Plant and Soil* 237: 225 – 237.
- Lynch, J. P. y M. Ho. 2005. Rhizoeconomics: carbon costs of phosphorus acquisition. *Plant and Soil* 269: 45-46.
- Manahan, S. E. 2005. *Environmental chemistry* (8th edition). CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 783 pp.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic press, London, Second edition.
- MDS Harris. 2007. Methods used by Harris Laboratory: soil analysis, plant analysis, media testing. [en línea] disponible en http://harristurf.crinet.com/lab_accuracy/procedures_methods.asp (verificado 15 marzo 2009).
- Melissa, D. H., J. C., Rosas, K. M., Brown, J. P. Lynch. 2005. Root architecture tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional Plant Biology* 32: 737-748.
- Miller, C. R., I., Ochoa, K. L., Nielsen, D., Beck, J. P. Lynch. 2003. Genetic variation for adventitious rooting in response to low phosphorus availability: potential utility for phosphorus acquisition from stratified soils [en línea]. Disponible en www.publish.csiro.au/journals/fpb. *Functional plant biology* 30: 973-985.
- Mitchell, C. C. 1993. Soil testing in the southeastern USA. *Soil Crop. Sci. Soc. Florida Proc.* 52: 73-78.

- Muñiz Torres, O. 1992. Uso de fertilizantes en Puerto Rico. Enfoques prácticos. Guía técnica. SEA, UPR-RUM. 26 p.
- Murphy, J., J.P Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta. 27: 31-36.
- Muurinen, S. 2007. Nitrogen dynamics and nitrogen use efficiency of spring cereals under finish growing conditions. University of Helsinki. Department of applied biology. Publications #29, 16p.
- Muurinen, S. G. A. Slafer, P. Peltonen-Sainio. 2006. Breeding effects on nitrogen use efficiency of spring cereals under northern conditions. Crop Sci. 46:561-568.
- Nielsen, K. L., C. R. Miller, D. Beck, J. P. Lynch. 1999. Fractal geometry: Field observations of contrasting genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different phosphorus regimes. Plant and soil 206: 181-190.
- NDSU (North Dakota State University). 1997. Dry bean production guide [en línea]. Disponible en <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/rowcrops/a1133-1.htm> (verificado 15 august 2007). Published in cooperation with Northarvest bean growers association.
- Ochoa, I., M., Blair, J. P., Lynch. 2006. QTL analysis of adventitious root formation in common bean under contrasting phosphorous availability. Crop Sci. 46: 1609-1621.
- Pachico, D. 1999. Common bean: The nearly perfect food. In: CIAT in focus, may 1999. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical [en línea] disponible a http://www.ciat.cgiar.org/es/sala_not/pdf/Beanfocus.pdf (verificado 9 de noviembre 2008).
- Pastor-Corrales, M.A., A. V. Schoonhoven. 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia 56p.
- Regent Instruments, 2007. WinRHIZO Basic v2007d. Regent Instruments Inc., Quebec, Canada.

- Rosas J.C., Beaver J.S., Escoto D., Perez C.A., Llano A., Hernandez J.C., and Araya R.. 2004. Registration of 'Amadeus 77' Small Red Common Bean. Crop Sci. 2004 44: 1867-1868.
- Roy, R. N., A. Finck, G. J. Blair, H. L. S. Tandon. 2006. Plant nutrition for food security, a guide for integrated nutrient management. FAO fertilizer and plant nutrition bulletin #16, 59 pp. [en línea] disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0443e/a0443e00.pdf> (verificado 3 de noviembre 2008)
- SAS Institute. 2003. Proprietary of software, version 9.1.3. SAS Institute, Cary, N.C.
- Sanchez, P. A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley, New York, 618 p.
- Schroder, E. 2006. Inoculantes. Notas de clase, capítulo 12, 11pp.
- Singh, S., T., Henry, C. G., Munoz, J. M., Osorno, J. C., Takegami, D. T. Thung. 2003. Low soil fertility tolerance in landraces and improved common bean genotypes. Crop Sci. 43:110-119.
- Singh, S. P., C. G. Muñoz, H. Terán. 2001a. Registration of common bacterial blight resistant dry bean germplasm VAX 1, VAX 3 and VAX 4. Crop Sci. 41:275-276.
- Singh, S. P., H. Terán, J. A. Gutiérrez. 2001b. Registration of SEA 5 and SEA 13 drought tolerant dry bean germplasm. Crop Sci. 41: 276-277.
- Snapp, S., R. Koide, J. P. Lynch. 1995. Exploitation of localized phosphorus-patches by common bean roots. Plant and Soil 177: 211-218.
- Sobkowicz, P. y R. Sinady. 2004. Nitrogen uptake and its efficiency in triticale (*Triticum secale* Witt.) – field beans (*Vicia faba* var *minor* L.) intercrop. Plant Soil Environ. 50: 500 – 506.
- Sotomayor-Ramírez. D. 2006. Calibración de pruebas de suelo. Notas de clase [en línea]. Disponible en <http://academic.uprm.edu/dsotomayor> (verificado 2 oct 2007).

- Sotomayor-Ramírez, D., G. A. Martínez. 2006A. The status of phosphorus and other fertility parameters in soils of Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P. R.* 90: 145-157.
- Sotomayor-Ramírez, D., G. A. Martínez. 2006B. Desarrollo de criterios numéricos para regular la concentración de nutrimentos en lagos de Puerto Rico. *Integrando Ciencias Agrícolas y Medio Ambiente*, Año 2, vol 1, pp 12-15.
- Stavely, J. R., G. F. Freytag, J. R. Steadman, H. F. Schwartz. 1983. The 1983 bean rust workshop. Annual report of bean improvement cooperative 26: 4-6.
- St-Pierre, C. A., H. R. Klinck, F. M. Gauthier. 1967. Early generation selection under different environments as it influences adaptation of barley. *Can. J. Plant. Sci.* 47:507-517.
- Syers, J. K., A. E. Johnston, D. Curtin. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin #18*. 122 p.
- Tsai, S. M., R. Bonetti, S. M. Agbala, R. Rossetto. 1993. Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. *Plant and Soil* 152: 131-138.
- Vadez, V., J. H. Lasso, D. P. Beck, J. J. Devron. 1999. Variability of N₂-fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under P deficiency is related to P use efficiency. *Euphytica* 106: 231-242.
- Vance, P. C., Stone, U. and D. L. Allan. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations for securing a non renewable resource. *New Phytologist* 157: 423 – 447.
- Vance, P. C. 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition, plant nutrition in a World of declining renewable resources. *Plant physiology* 127: 390-397.
- Vargas, A. T. M., I. C., Mendes, M. Hungria. 2000. Response of field grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to rhizobium inoculation and nitrogen fertilization in two cerrados soils. *Biol. Fertil. Soils* 32: 228-233.

- Velazquez Y. A., R. Kluson, E. C. Schroder. 1988. Rhizobium inoculation of Phaseolus vulgaris in Lajas, Puerto Rico. J. Agric. Univ. Puerto Rico 72: 427-435.
- Vitousek, P. M., J. A. Chair, R. W. Howarth, G. E. Likens, P. A. Matson, D. W. Schindler, W. H. Schlesinger, G. D. Tilman. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: causes and consequences. Issues in ecology, Ecological Society of America, Washington. [En línea] disponible en http://www.esa.org/science_resources/issues/fileenglish/issue1.pdf verificado 15 marzo 2009.
- Wahab, A. H., E. Montague-Gordon, J. Dehaney, A. L. Wright, M. A. Lugo-López. 1985. Performance of eleven dry beans cultivars (Phaseolus vulgaris) over two successive seasons of the hillsides of Jamaica. J. Agric. Univ. Puerto Rico 69: 245-254.
- Yan, X. S. E. Beebe, J. P. Lynch. 1995. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: II. Yield response. Crop Sci. 35: 1094-1099.

APENDICES

Apéndice 1: Rendimiento de las líneas VIDAC rojo evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Resistencia roya		Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	Pústula	Infección (%)		
X02-33-171-4	6.0	1.0	158.4	2609
0340-3-3-1	1.0	0.0	163.2	2496
X02-33-171-2	6.0	1.5	163.9	2370
IBC 308-83	3.5	0.5	150.0	2225
X02-33-171-3	6.0	1.0	180.6	2189
MER 2226-28	1.0	0.0	183.4	2181
IBC 306-95	6.0	2.0	172.3	2173
IBC 309-23	1.0	0.0	144.5	2173
ALS 9951-101	6.0	1.0	152.8	2167
X02-33-171-1	6.0	2.0	155.6	2156
IBC 308-15	1.0	0.0	141.7	2073
X02-33-174-1	6.0	1.0	141.7	2028
MER 2226-24	1.0	0.0	172.3	1978
MER 2212-35	1.0	0.0	147.3	1964
MER 2212-28	1.0	0.0	147.3	1942
X02-33-174-2	6.0	1.0	155.6	1895
RBF 11-28	6.0	4.0	172.3	1892
IBC 308-67	6.0	1.5	161.1	1861
PR0310-244-2	6.0	1.0	150.0	1836
IBC 309-12	3.5	0.5	144.5	1817
PR0310-222-2	6.0	3.0	155.6	1814
X02-33-174-3	6.0	1.0	166.7	1806
IBC 306-109	6.0	1.5	152.8	1795
IBC 302-29	3.5	0.5	179.6	1794
Salagnac 90 A	6.0	4.3	160.7	1787
IBC 306-34	6.0	1.0	150.0	1786
MER 2224-5	6.0	1.5	169.5	1753
MER 2225-74	6.0	1.0	152.8	1753
IBC 308-24	6.0	1.0	180.6	1742
RBF 15-38	6.0	2.0	158.4	1734
IBC 306-80	6.0	1.0	141.7	1731
IBC 308-1	6.0	2.5	161.1	1731
RBF 11-71	6.0	3.5	155.6	1709
IBC 301-152	6.0	1.0	172.3	1689
MR 14148-6	6.0	1.5	169.5	1689
RBF 2-11	6.0	1.0	125.0	1667

Apéndice 1: Continuación

Líneas	Resistencia roya		Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	Pústula	Infección (%)		
IBC 301-144	6.0	1.0	152.8	1664
IBC 308-26	6.0	1.5	172.3	1661
IBC 306-97	6.0	1.0	147.3	1659
IBC 305-11	6.0	2.0	162.9	1639
IBC 308-25	6.0	2.0	152.9	1627
IBC 306-85	6.0	1.0	161.1	1625
IBC 305-44	6.0	3.0	147.3	1620
IBC 306-55	6.0	1.5	166.7	1614
IBC 307-7	6.0	1.0	150.0	1611
RBF 18-72	1.0	0.0	141.7	1611
RBF 16-71	6.0	2.5	150.0	1592
IBC 305-67	1.0	0.0	150.0	1584
0340-26-3-3	3.5	0.5	161.1	1575
IBC 305-35	6.0	1.5	180.6	1575
IBC 306-81	6.0	1.0	144.5	1575
0348-186-1-6	6.0	1.0	163.9	1570
IBC 306-93	6.0	1.0	166.7	1570
MER 2226-29	3.5	0.5	138.9	1553
IBC 301-182	6.0	1.0	180.6	1550
MER 2226-10	6.0	1.0	152.8	1548
MORALES	6.0	1.8	182.9	1543
RBF 11-29	6.0	1.0	133.4	1539
RBF 11-84	6.0	2.5	152.8	1531
RBF 13-31	6.0	7.5	144.5	1520
RBF 11-30	6.0	1.0	147.3	1517
IBC 301-52	6.0	1.0	144.5	1500
IBC 305-6	6.0	2.0	141.7	1500
RBF 12-72	6.0	1.0	141.7	1486
IBC 301-181	6.0	1.0	141.7	1470
MER 2226-23	6.0	1.0	155.6	1470
RBF 12-54	6.0	1.5	152.8	1467
IBC 301-53	6.0	1.5	169.5	1420
IBC 308-21	6.0	1.0	144.5	1414
IBC 308-85	6.0	1.0	150.0	1392
0348-174-1-4	3.5	0.5	147.3	1375
RBF 18-32	3.5	0.5	144.5	1375
IBC 306-44	6.0	1.0	147.3	1373
MER 2226-35	6.0	1.5	159.6	1354

Apéndice 1: Continuación

Líneas	Resistencia roya		Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	Pústula	Infección (%)		
IBC 306-62	6.0	1.0	161.1	1336
IBC 308-103	6.0	1.5	177.8	1331
IBC 306-77	6.0	1.5	138.9	1325
RBF 12-5	6.0	2.0	158.4	1317
RBF 18-64	6.0	1.0	144.5	1295
IBC 301-204	6.0	2.0	144.5	1286
MER 2226-12	6.0	1.0	133.4	1270
RBF 19-116	6.0	1.0	152.8	1259
RBF 13-75	6.0	1.0	166.7	1242
RBF 14-80	6.0	1.5	141.7	1239
0348-174-2-1	6.0	2.5	120.4	1229
IBC 306-21	6.0	2.0	141.7	1222
IBC 308-7	6.0	1.5	133.4	1197
IBC 306-79	6.0	1.5	166.7	1167
RBF 12-49	6.0	1.0	147.3	1134
RBF 18-18	6.0	2.0	166.7	1134
ALS 9951-92-R2	3.5	0.5	158.4	1128
RBF 16-12	6.0	1.0	152.8	1125
RBF 16-8	6.0	2.0	147.3	1114
RBF 16-82	6.0	9.0	152.8	970
RBF 16-16	6.0	3.5	141.7	917
Mean	5	1	154.8	1,616
LSD (0.05)	-	-	52.6	937
CV (%)	-	-	14.87	25.55

Apéndice 2: Rendimiento de las líneas VIDAC negro evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Resistencia roya		Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	Pústula	Infección (%)		
ALS 20-2-36	6.0	3.0	141.7	1,278
BCN 20-2-49	1.0	0.0	155.6	1,059
BCN 20-2-81	6.0	1.5	166.7	1,556
BCN 20-2-82	6.0	3.0	161.1	1,145
BCN 20-3-42	6.0	3.5	138.9	1,070
BCN 20-3-62	6.0	4.0	141.7	1,197
BCN 20-3-82	6.0	2.0	158.4	1,373
BCN 20-7-65	6.0	6.5	136.1	1,450
EA 3	1.0	0.0	150.0	1,453
MEN 2201-64	1.0	0.0	163.9	1,725
MEN 2202-72	3.5	1.0	158.4	1,009
MEN 2207-44	6.0	6.5	155.6	1,739
MEN 2207-66	3.5	0.5	158.4	1,581
MH-9-12	6.0	2.5	183.4	1,225
MN 14059-7	6.0	2.0	152.8	1,817
MR 14145-36	6.0	3.0	163.9	1,495
MR 14212-6	6.0	3.0	133.4	1,564
PPB 22-40	6.0	1.5	147.3	1,178
PR-0333-104	6.0	3.0	147.3	1,370
PR-0333-169	6.0	1.5	141.7	1,550
PR-0333-27	6.0	5.0	152.8	1,598
PR-0333-30	6.0	2.0	144.5	1,209
PR-0333-8	6.0	9.0	147.3	1,492
PR-0333-90	6.0	12.5	141.7	1,453
PR-0334-121	6.0	2.5	136.1	1,247
PR-0334-59	3.5	1.0	160.2	1,444
RBF 11-33	6.0	3.0	161.1	1,767
RBF 11-36	6.0	3.5	175.0	1,800
RBF 11-60	6.0	4.0	152.8	1,550
RBF 14-34	6.0	1.0	155.6	1,645
RBF 14-54	3.5	0.5	155.6	1,786

Apéndice 2: Continuación

Líneas	Resistencia roya		Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	Pústula	Infección (%)		
RBF 15-17	6.0	9.0	158.4	1,692
RBF 15-70	6.0	6.5	161.1	1,300
RBF 19-63	6.0	5.0	172.3	1,606
RBF 19-69	6.0	7.5	161.1	1,109
RBF 20-86	6.0	6.5	152.8	1,506
RBF 7-25	6.0	8.5	136.1	1,014
Salagnac 90	6.0	9.9	155.6	1,626
SRS 66-1	1.0	0.0	171.2	1,197
X02-33-14-1	6.0	2.0	163.9	1,295
X02-33-14-2	6.0	1.0	158.4	1,242
X02-33-147-3	6.0	1.5	130.6	1,553
X02-33-15-1	6.0	2.5	143.1	1,432
X02-33-15-2	6.0	6.5	136.1	1,350
X02-33-153	6.0	3.0	158.4	1,275
X02-33-157	6.0	9.0	161.1	1,414
X02-33-161	6.0	4.0	158.4	1,341
X02-33-16-1	6.0	2.5	136.1	1,325
X02-33-16-2	6.0	2.0	153.9	1,436
XRAV-117-2	6.0	7.5	150.0	1,634
XRAV-117-3	6.0	7.5	163.9	1,400
XRAV-169-3	6.0	5.0	155.6	1,031
XRAV-187-3	6.0	7.5	150.0	1,045
XRAV-40-3	6.0	7.5	147.3	856
XRAV-40-4	6.0	15.0	147.3	728
XRAV-63-8	6.0	3.0	136.1	714
XRAV-68-1	6.0	5.0	141.7	1,059
XRAV-71-2	6.0	2.0	147.3	1,245
XRAV-96-11	6.0	1.5	158.4	1,539
Mean	5.5	4.1	152.6	1,369
LSD (0.05)	-	-	51.8	816
CV (%)	-	-	14.84	25.84

Apéndice 3: Rendimiento de las líneas de la escuela Panamericana evaluadas en el experimento de selección de las mejores líneas de habichuela, Isabela, febrero 2007.

Líneas	Resistencia Roya	Densidad (1000 pl ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
A774	S	167.6	2,153
RBF-11-29	S	150.0	2,037
IBC-309-23	S	180.6	2,028
Amadeus 77	S	161.1	1,795
IBC-305-67	R	172.3	1,781
IBC301-182	S	158.4	1,770
RBF-11-84	MS	155.6	1,761
PR0443-151	S	183.4	1,748
RBF-12-54	S	152.8	1,745
RBF-14-65	S	172.3	1,736
IBC-308-15	S	183.4	1,706
SER 16	S	177.8	1,698
RBF-2-1	S	161.1	1,667
RBF-18-72	R	155.6	1,598
IBC301-152	MS	158.4	1,589
RBF-15-38	S	172.3	1,570
IBC-305-35	S	158.4	1,561
IBC-306-34	S	155.6	1,556
IBC-309-12	S	158.4	1,542
IBC-302-29	MS	169.5	1,520
IBC-305-6	S	155.6	1,517
IBC-308-24	S	158.4	1,517
IBC-306-80	S	125.0	1,506
IBC-306-109	S	154.2	1,502
RBF-16-71	MS	180.6	1,500
RBF-11-28	MS	113.9	1,489
IBC-301-204	S	161.1	1,473
RBF-12-72	S	166.7	1,470
IBC-306-79	S	169.5	1,442
RBF-14-26	S	166.7	1,439
IBC-306-44	S	169.5	1,431
RBF-14-80	S	177.8	1,431

Apéndice 3: Continuación

Líneas	Resistencia Roya	Densidad (1000 pl/ha)	Rendimiento (kg/ha)
IBC-306-55	S	141.7	1,428
IBC-301-52	S	172.3	1,409
IBC-306-97	S	150.0	1,403
IBC-308-7	S	155.6	1,398
IBC-306-95	S	175.0	1,392
IBC-301-144	S	158.4	1,347
IBC-301-181	S	177.8	1,325
IBC-305-44	S	161.1	1,314
RBF-12-49	S	116.7	1,300
RBF-17-49	S	158.4	1,300
IBC-301-53	S	166.7	1,297
IBC-306-62	S	138.9	1,295
IBC-305-11	S	172.3	1,270
IBC-307-7	S	161.1	1,264
IBC-308-85	S	166.7	1,259
IBC-306-85	S	150.0	1,253
IBC-308-1	S	150.0	1,253
IBC-306-77	S	144.5	1,250
Morales	S	175.0	1,236
SEA 5	MS	166.7	1,236
IBC-308-26	S	155.6	1,234
IBC-306-21	S	155.6	1,231
RBF-18-32	S	161.1	1,231
RBF-14-28	S	150.0	1,211
Salagnac 90	S	172.3	1,211
RBF-13-31	MS	150.0	1,175
IBC-308-83	R	169.5	1,164
RBF-11-71	MS	91.7	1,153
RBF-19-116	S	167.5	1,135
RBF-18-64	S	166.7	1,109
IBC-308-67	S	152.8	1,095
RBF-12-5	S	133.4	1,081
BAT 477	S	147.3	1,075
RBF-16-6	MS	177.8	1,067
IBC-308-21	S	158.4	1,064

Apéndice 3: Continuación

Líneas	Resistencia Roya	Densidad (1000 pl/ha)	Rendimiento (kg/ha)
IBC-308-103	S	163.9	1,059
Verano	S	155.6	1,042
IBC-308-25	S	138.9	1,025
PR0301-181	S	163.9	1,020
RBF-16-49	S	150.0	992
RBF-16-22	MS	141.7	975
RBF-16-8	MS	129.8	956
RBF-16-2	S	152.8	906
RBF-13-75	S	147.3	884
RBF-16-82	MS	138.9	767
Mean		157.9	1368
LSD (0.05)		63.24	1000
CV (%)		17.4	31.85

* R = Resistente

S = Susceptible

MS = Muy Susceptible