

Mejoramiento de la tolerancia de frijol a la baja fertilidad del suelo

James S. Beaver – Universidad de Puerto Rico

Taller Regional de Mejoramiento de la Tolerancia del Frijol Común a Estrés Abióticos
(Puerto Rico, 15-17 de Agosto, 2016)

Estrategias para afrontar los factores edáficos que limitan el rendimiento del frijol

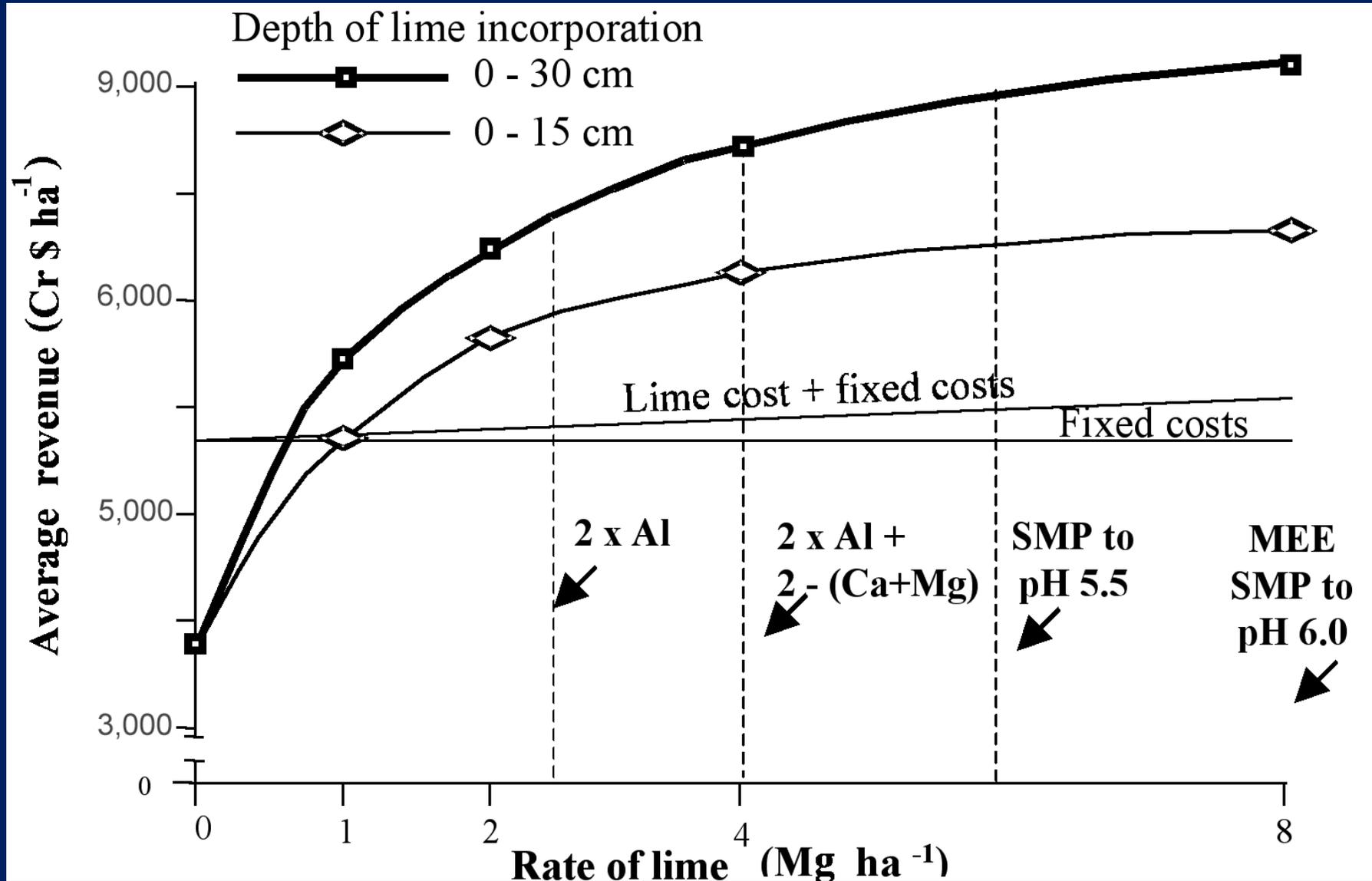
- Cambiar las características del suelo que limitan la productividad de los cultivos
 - El encalado de los suelos ácidos
 - El uso de abonos verdes para aumentar la materia orgánica del suelo.
 - El uso de abonos orgánicos (estiércol, residuos orgánicos) y/o fertilizantes minerales

Estrategias para afrontar los factores edáficos que limitan el rendimiento del frijol

- Cambiar las características del suelo que limitan la productividad de los cultivos
 - Un ejemplo de éxito: Los suelos 'campo cerrado' en Brasil
 - La aplicación de niveles adecuados de cal y fertilizantes después de eliminar la vegetación natural.
 - Aumentar la fertilidad del suelo y el mantenimiento de la misma mediante la sustitución anual de los nutrientes extraídos por la cosecha, principalmente P, K, y N.

Fuente: Siquiera Resck et al. 2006. Management systems in Northern South America.

El ingreso promedio de cinco siembras de maíz, una siembra de sorgo y una siembra de soja - suelo campo cerrado - Brasil



Las cuatro 'C' del manejo de los nutrientes del suelo

- La fuente y el tipo correcto de fertilizante
 - ¿Cuáles son las características del suelo que limitan el rendimiento de semilla?
 - Precio y disponibilidad de fertilizantes, los riesgos ambientales y las limitaciones económicas afectan la decisión de utilizar fertilizantes.

Las cuatro 'C' del manejo de los nutrientes del suelo

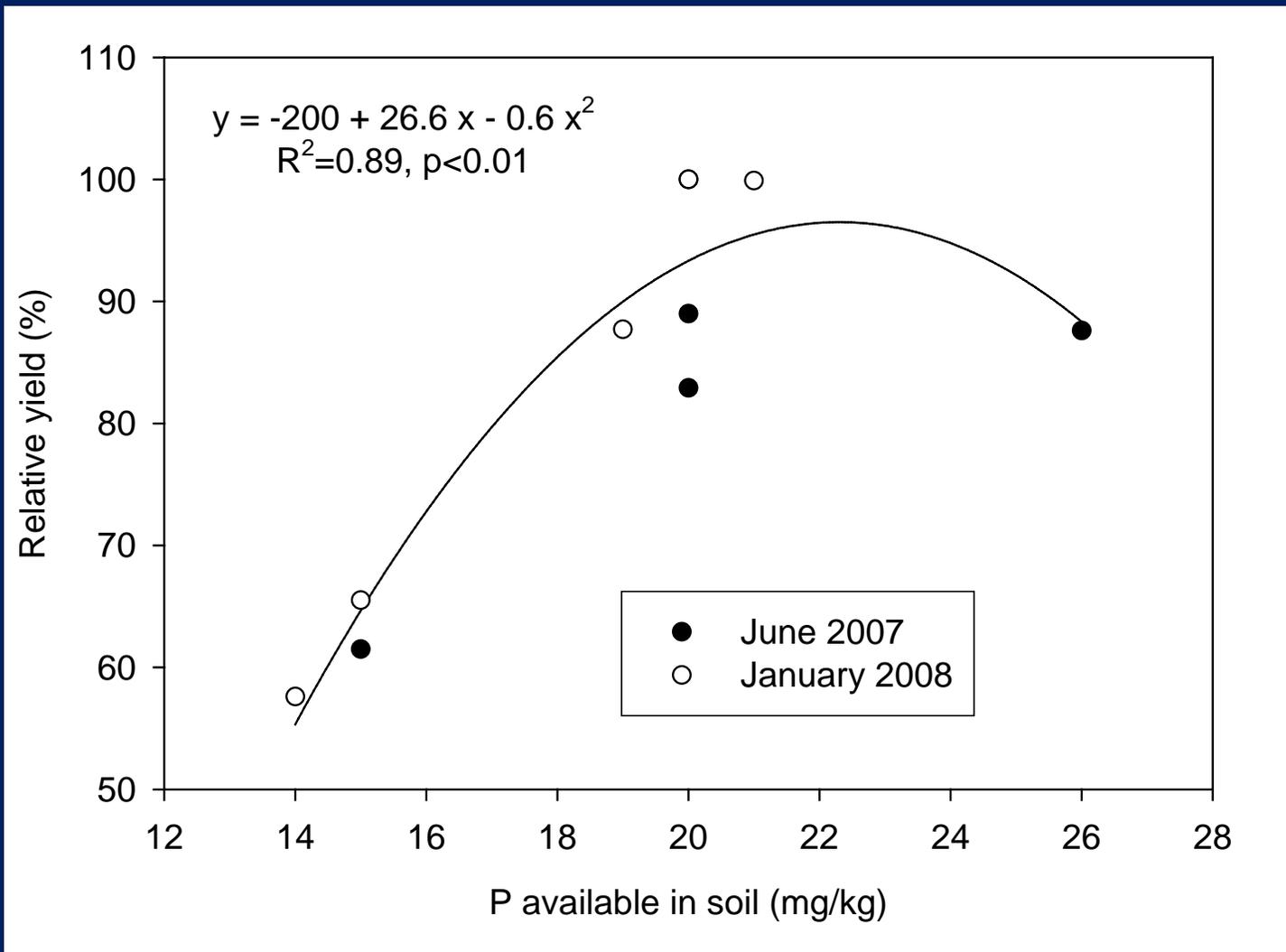
- La cantidad correcta de fertilizante
 - ¿Cuáles fueron los cultivos anteriores?
 - ¿Cuál es el rendimiento esperado?
 - ¿Cuál es la respuesta del cultivo a diferentes niveles de nutrientes en el suelo?

Los resultados de un análisis del suelo de la Subestación de Isabela (oxisol)

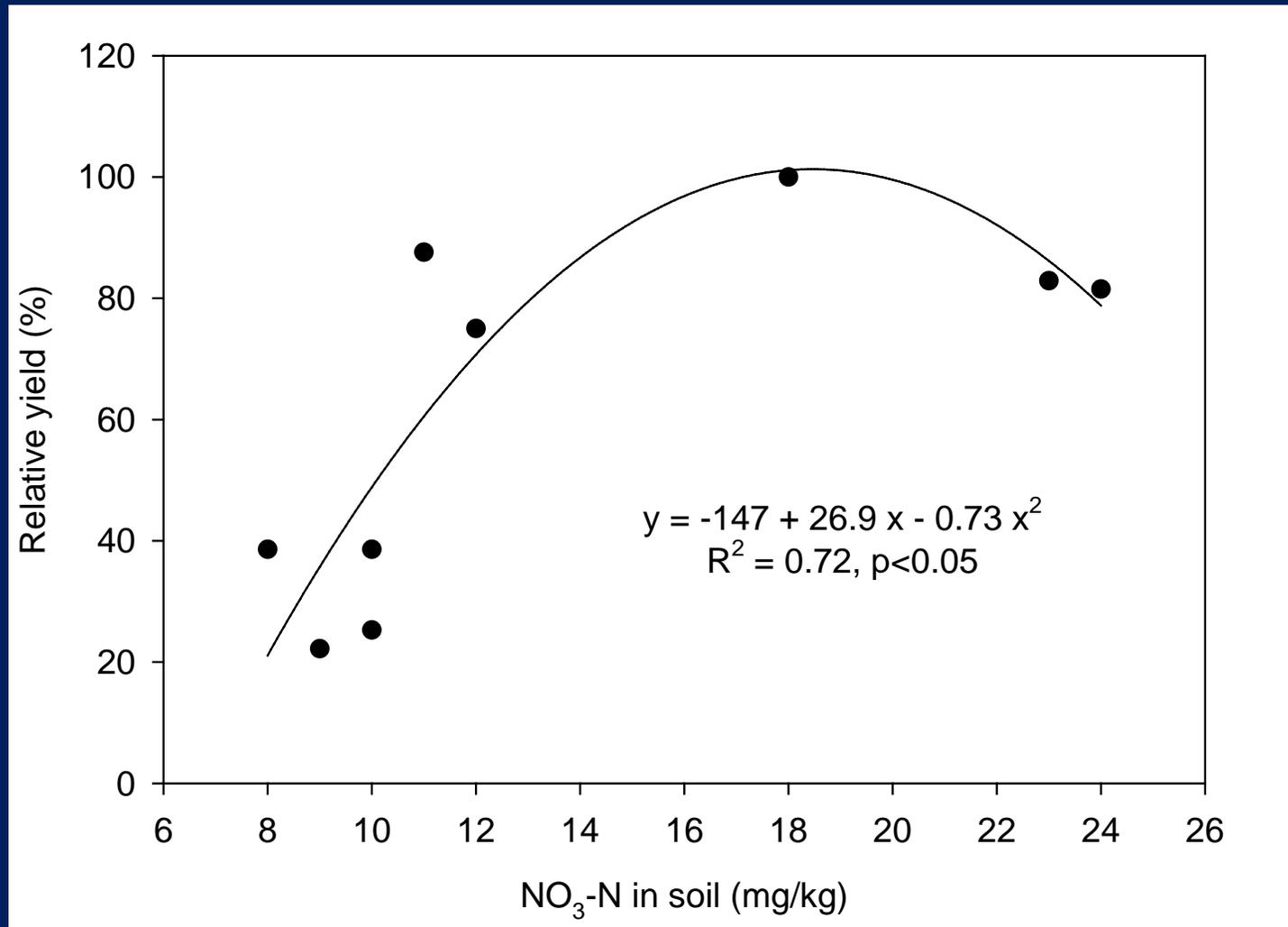
pH	MO	NO ₃ ⁻ N	P	Ca	Mg	K	CIC	Fe	Mn	Zn	Cu
	%	--mg kg ⁻¹ --		--cmol kg ⁻¹ --				-----ppm-----			
5.6	4.0	13.8	24.0	4.3	0.60	0.28	7.0	21.2	7.7	0.53	2.7
M	A	M	A	M	B	M	M	A	A	M	A

*Nivel fertilidad en el suelo: B=bajo, M=mediano, A=alto.

- Los resultados de los análisis del suelo son específicos para el campo y el año del muestreo.
- Los niveles óptimos de nutrientes varían entre cultivos y sus rendimientos esperados.



Relación entre niveles extraíbles de P del suelo y el rendimiento de semillas de habichuela en la Subestación de Isabela (oxisol). Fuente: Dorcinvil et al. (2009)



Relación entre niveles extraíbles de nitrato del suelo y el rendimiento de semillas de habichuela en la Subestación de Isabela (oxisol). Fuente: Dorcinvil et al. (2009)

Los cuatro 'C' del manejo de los nutrientes del suelo

- Aplicación del fertilizante en el momento correcto
 - Múltiples aplicaciones de fertilizantes
 - Ayudan a suministrar los nutrientes cuando las plantas los necesitan.
 - Menos fertilizante se pierde debido a la lixiviación.
 - Una mayor porción de los nutrientes del fertilizante es utilizada por las plantas.

Los cuatro 'C' del manejo de los nutrientes del suelo

- La aplicación del fertilizante en el lugar correcto
 - La colocación correcta del abono es importante para maximizar la utilización de los nutrientes por las plantas y reducir la pérdida de los nutrientes.
 - La colocación correcta del abono podría variar para diferentes tipos de fertilizantes.
 - La aplicación de fertilizantes en bandas vs. la aplicación al voleo. (Bandas se encuentran más cerca de las raíces en concentraciones más altas y en mayor disponibilidad. Fertilizante aplicado en bandas también es menos vulnerable a la erosión.)

Estrategias para afrontar los factores edáficos que limitan el rendimiento del frijol

1. Utilizar prácticas de manejo para minimizar la erosión del suelo.
 - Los horizontes superficiales del suelo contienen la mayor parte de los nutrientes.
2. La aplicación de estiércol, abonos verdes y residuos de plantas aumenta la disponibilidad de P y otros nutrientes.
 - La descomposición de materia orgánica libera P lentamente que permite su utilización por las plantas antes de ser fijado en el suelo.

Estrategias para afrontar los factores edáficos que limitan el rendimiento del frijol

- Cambiar las características del cultivo para mejorar su adaptación a las principales limitaciones edáficas.
 - Los suelos bajos en P
 - Los suelos bajos en N
 - Los suelos ácidos y la toxicidad de Al

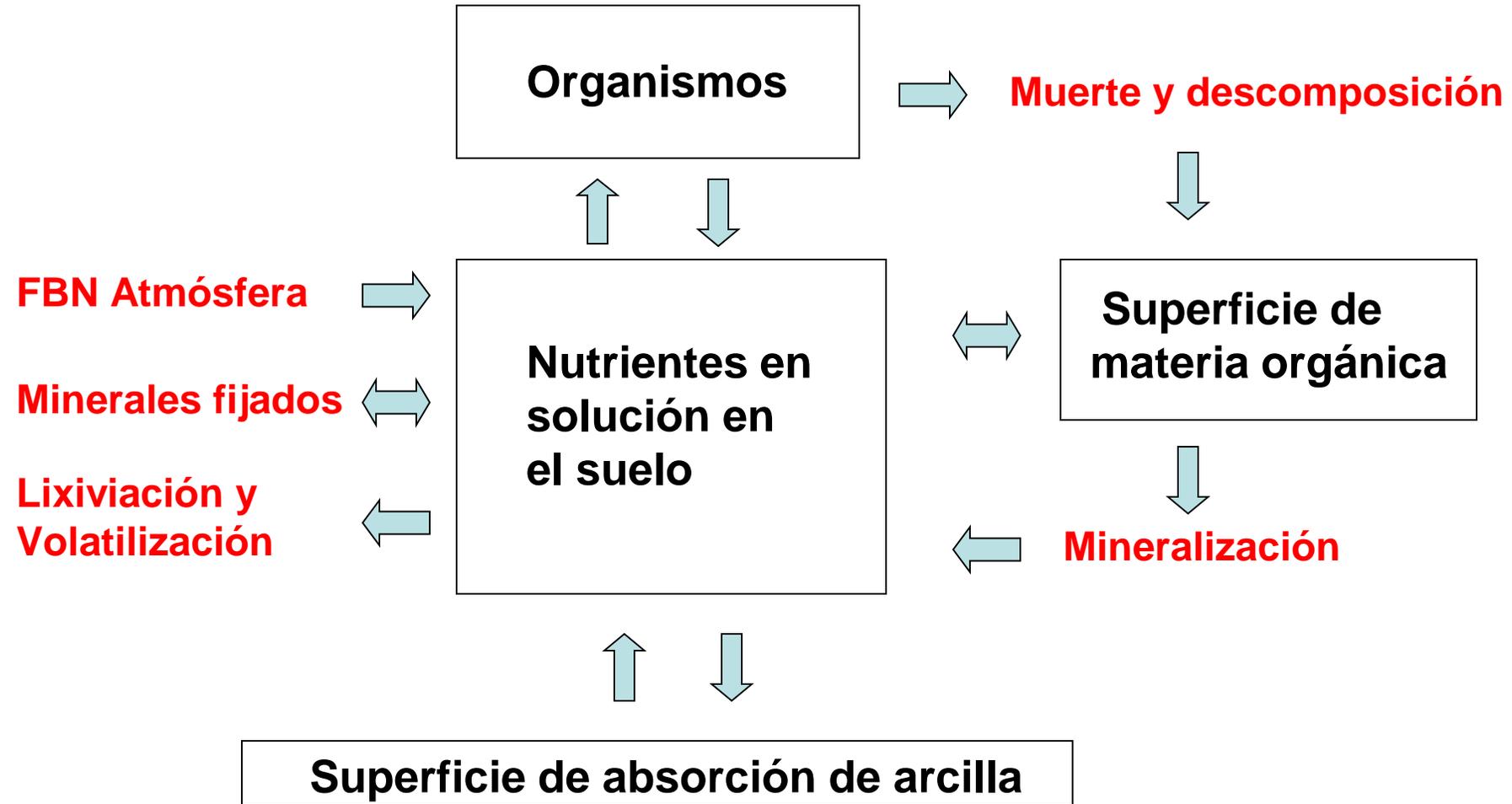
	Importancia regional	
	América Latina y el Caribe	Africa
Factores abióticos		
Sequía	+++	+++
Altas temperaturas	+++	++
Deficiencia de N	++	+++
Deficiencia de P	+++	+++
Las toxicidades de los suelos ácidos (Al, Mn)	++	+

Fuente: Beebe et al. (2012) Improving Resource Use Efficiency and Reducing Risk of Common Bean Production in Africa, Latin America and the Caribbean. In Eco-Efficiency: From Vision to Reality.

Importancia de N y P como nutrientes de las plantas

- N y P son componentes centrales de moléculas necesarias para el funcionamiento de las células de plantas (ADN, ARN, ATP y proteínas).
- La baja disponibilidad de fósforo y/o nitrógeno son limitaciones importantes para la producción agrícola que puede reducir grandemente el rendimiento de semilla del cultivo (Beebe, 2012; Lynch, 2007).

El flujo de nutrientes en el ecosistema



Estrategias para afrontar los factores edáficos que limitan el rendimiento del frijol

1. Raíces sanas

- La resistencia genética a la pudrición de la raíz permite una mejor absorción de los nutrientes en el suelo.
- La rotación de los cultivos puede reducir la incidencia y severidad de la pudrición de la raíz.
- El impacto negativo de las enfermedades de las raíz de varios cultivos puede reducirse mediante de la aplicación de P (Better Crops 83:26-27).

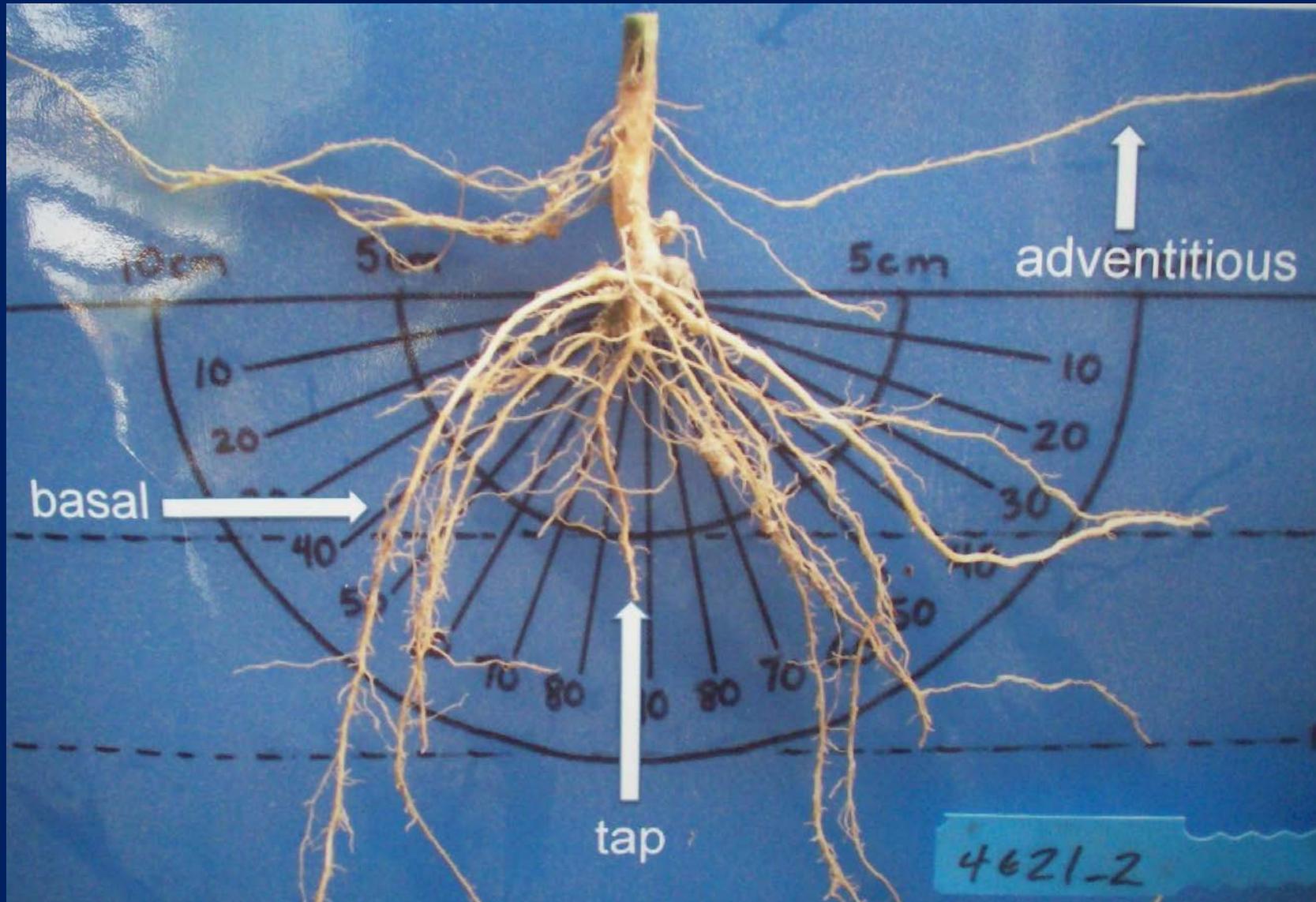
Síntomas de deficiencia de P

1. Hojas pequeñas (reduce Fs)
2. Entrenudos cortos y una ramificación reducida
3. Hojas pueden envejecer y caer más temprano de lo normal



Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

1. Genotipos con raíces poco profundas tuvieron un mayor crecimiento vegetativo y rendimiento de semilla en suelos bajos en fósforo (Henry et al. 2009).
 - Esta característica de la raíz mejora la absorción de P en los horizontes superficiales del suelo. Es ventajosa porque la biodisponibilidad de fósforo es típicamente mayor en esta zona.
 - Una desventaja potencial: Las raíces poco profundas son menos tolerantes que las raíces profundas a la sequía.



Sistema de la raíz de una planta de frijol

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

1. Genotipos con raíces poco profundas tuvieron un mayor crecimiento vegetativo y rendimiento de semilla en suelos bajos en fósforo (Henry et al. 2009).
 - ¿Podría ser una característica más útil para épocas o zonas más húmedas como el Petén en Guatemala, el Oriente de Nicaragua o Costa Rica?
 - ¿Selección de raíces con la plasticidad fenotípica? Evaluar líneas en suelos + P y - P para seleccionar líneas que producen raíces menos profundas en condiciones de - P y raíces más profundas en suelos que no son limitantes en P.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

1. La exudación de ácidos orgánicos y fosfatasa en el suelo.
 - Exudados de la raíz tales como fosfatasa, ácidos orgánicos, y otros compuestos quelantes ayudan a movilizar P del P fijo en el suelo.
 - Yan et al. (2004) informaron que la línea de germoplasma G 19833, que se adapta mejor a los suelos con bajo contenido de P, tiene raíces que producen significativamente más exudación de ácidos orgánicos y H^+ que el testigo DOR 364.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

2. La exudación de ácidos orgánicos y fosfatasas en el suelo.

- En plantas transgénicas la sobreexpresión de los genes de fosfatasa (una enzima que quita un fosfato de su sustrato) generalmente aumentan la eficiencia del uso de P en plantas, independientemente del origen de los genes. (Zhang et al. 2014).
- Liang et al. (2009) identificaron PvPAP3, un gen de fosfatasas ácidos púrpura que contribuyen a la adaptación de la línea de germoplasma de frijol (G 19833) a los suelos bajos en fósforo.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

3. La exudación de ácidos orgánicos y fosfatasas en el suelo.

- Mayor longitud y densidad de los pelos radiculares se correlacionaron positivamente con la exudación de los ácidos orgánicos (Yan et al., 2004).
- Jochua (2013) reportó una correlación fuerte y positiva entre la longitud y la densidad de los pelos radiculares en dos poblaciones de frijol.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

3. La exudación de ácidos orgánicos y fosfatasas en el suelo.

- Alta heredabilidad sugiere que es posible seleccionar pelos radicales más largos en poblaciones segregantes de frijol (Jochua, 2013). 'SEA 5' y 'VAX 1' tienen pelos radicales más largos y densos.
- Miguel (2012) encontró que un ángulo de crecimiento poco profundo de las raíces basales (BRGA) y largos pelos radicales son sinérgico para la adquisición de fósforo.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

3. La exudación de ácidos orgánicos y fosfatasa en el suelo.
 - Miguel (2012) informó que hay varias regiones genómicas que contienen QTL o genes que pueden contribuir al desarrollo de las raíces basales.
 - Utilizando análisis de QTL's con marcadores moleculares, tres loci (Tae4.1, Hex4.1 y Hex10.1) fueron identificados que están estrechamente ligados a la absorción de P en el campo (Yan et al., 2004).

Procedimiento para la medida de la longitud del pelos radicales

- Laboratorio de raíces - Universidad de Penn State
- <http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/metodologia-de-investigacion/pelos-radicales/protocolos-para-la-visualizacion-de-pelos-radicales/procedimiento-para-la-medida-de-la-longitud-del-pelos-radicales>

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

3. La formación de aerénquima cortical de la raíz (FAC)

- El aerénquima es un tejido vegetal con espacios intercelulares llenos de aire.
- Postma y Lynch (2010) observaron que la formación de FAC reduciría respiración de las raíces y el contenido de nutrientes mediante la conversión de tejido vivo en espacios intercelulares.
- Esto aumentaría la adquisición de recursos del suelo mediante la reducción del costo metabólico y de fósforo de la exploración del suelo.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

4. Diferencias en absorción de fósforo y la eficiencia del uso de fósforo.
 - Genotipos de frijol varían en absorción y eficiencia del uso de P.
 - Eficiencia incluye la adquisición de P del suelo y el reparto de P dentro de la planta. Plantas pueden translocar más del 50% de P de las hojas senescentes.
 - Absorción y eficiencia del uso de P de los genotipos de frijol puede variar para diferentes limitaciones edáficas.
 - Interacción genotipo x ambiente puede complicar los esfuerzos para mejorar la eficiencia del uso de P

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

4. Diferencias en absorción de fósforo y la eficiencia del uso de fósforo.
 - Un mayor número de verticilos radiculares (BRWN) es beneficioso para la adquisición de fósforo en los suelos bajos de fósforo (Miguel, 2012).
 - Genotipos con mayor BRWN tenían más biomasa aérea, mayor longitud de las raíces y más área foliar en suelos con bajo contenido de fósforo (Miguel, 2012).
 - Protocolo para la evaluación de verticilos radiculares (whorls)
<http://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/metodologia-de-investigacion/protocolo-para-la-evaluacion-de-verticilos-radiculares-whorls>

	Sequía y bajo P			Toxicidad de Al		
Genotipo	Rendimiento (kg/ha)	Absorción de P de la planta (kg/kg)	Eficiencia del uso de P (kg/kg)	Rendimiento (kg/ha)	Absorción de P de la planta (kg/kg)	Eficiencia del uso de P (kg/kg)
SEN 56	471	1.56	302	721	4.78	151
BAT 477	913	2.70	338	637	1.81	352
Carioca	614	1.05	585	693	3.23	215
NCB 226	1047	1.40	748	522	2.03	257
LSD (0.05)	243	0.64		250	1.80	

Fuente: Beebe et al. (2012) Improving Resource Use Efficiency and Reducing Risk of Common Bean Production in Africa, Latin America and the Caribbean. In Eco-Efficiency: From Vision to Reality.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

5. Micorrizas vesiculares-arbusculares existen en la mayoría de los suelos agrícolas y pueden mejorar la absorción de P.
 - Micorrizas y raíces de las plantas forman una importante relación simbiótica en la mayoría de las especies de plantas.
 - La planta sule al hongo con fotosintatos y el hongo mejora la absorción de P y de agua y aumenta la resistencia a las enfermedades de la raíz.
 - Se puede aumentar la absorción de P de los fertilizantes con la adición de micorrizas a los suelos si los números iniciales de micorrizas en el suelo son bajos.
 - ¿La respuesta por la adición de micorrizas sería mayor en los suelos degradados?

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de P

5. Micorrizas vesiculares-arbusculares existen en la mayoría de los suelos agrícolas y pueden mejorar la absorción de P.
 - ¿Sería posible seleccionar para una relación simbiótica más efectiva entre el frijol y las micorrizas?
 - ¿Hay una respuesta diferencial de las líneas de frijol a la colonización de micorrizas? Haciasalihoglu et al., 2005 informaron que los cultivares 'Jamapa' y 'Calima' tenían las respuestas más positivas a adición de micorrizas.
 - Las cepas de micorrizas necesitan causar la infección en las raíces de frijol y también ser eficaces en la absorción de P.

El desarrollo de frijol con mayor capacidad de fijación biológica de nitrógeno (FBN) y tolerancia a los suelos con bajo contenido de P requerirá varios ciclos de selección y la selección asistida por marcadores

- Hernandez et al. (2007) utilizaron técnicas de genómica funcional para investigar la expresión génica global y las respuestas metabólicas de las plantas de frijol cultivadas en niveles adecuados y deficientes de P.
 - Un total de 126 genes, que representan diferentes categorías funcionales, mostró expresión diferencial significativo en la respuesta a P.
 - 62% de los genes fueron inducidos en las raíces deficientes en P.
 - ¿Cuáles genes son más importantes para el desarrollo de líneas de frijol con mayor tolerancia a P?

Síntomas de deficiencia de N

1. Retraso en crecimiento.
2. Entrenudos más cortos.
3. Hojas pequeñas de color amarillo.
4. Las hojas más viejas se ven afectadas primero (N es móvil dentro de la planta).



Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

1. Mayor capacidad de fijación biológica de nitrógeno.
 - Debería seleccionar líneas de frijol para la fijación de N_2 en suelos bajos en N.
 - El contenido de nitrógeno en la semilla (rendimiento económico) y el contenido de nitrógeno de la biomasa de la planta deben ser los criterios de selección.
 - La última característica se incluye para distinguir entre líneas con niveles superiores de fijación de N_2 y líneas con altos índices de cosecha (reparto) de N (Graham et al. 2004).

Cultivo o planta simbiótico	Organismo asociado	Niveles típicos de fijación de N (kg N/ha/año)
Leguminosas (nódulos)		
<i>Leucaena leucocephala</i>	Bacteria (<i>Rhizobium</i>)	100-500
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)		150-250
Trébol (<i>Trifolium pratense</i>)		100-150
Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)		30-50
Caupí (<i>Vigna unguiculata</i>)	Bacteria (<i>Bradyrhizobacteria</i>)	50-100
Maní (<i>Arachis spp.</i>)		40-80
Soya (<i>Glycine max</i>)		50-150
Gandul (<i>Cajanas cajan</i>)		150-280

Factores ambientales que afectan la fijación biológica de nitrógeno

- Fuente de energía: Condición de la planta: Incluye todos los factores que afectan la habilidad de la planta para proveer energía.
- La razón entre el carbono y el nitrógeno en el suelo. Por ejemplo, una razón de C:N (70:1) puede estimular la actividad del *Rhizobium*.
- Condición del suelo
 - Temperatura (30° C, 86° F)
 - Humedad: el ambiente no debería ser demasiado húmedo o seco.
 - pH $> 4.2 < 7.0$ es importante para la disponibilidad de ciertos nutrientes.
- La fijación de nitrógeno es uno de los procesos de las plantas más sensibles al estrés ambiental y se reduce drásticamente por la deficiencia de P o por la sequía (Beebe et al., 2012).

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

1. Heilig et al. (2016) Análisis de QTL's de fijación biológica de nitrógeno en una población RIL de frijol negro.
 - 122 líneas RIL de 'Puebla 152 x Zorro' evaluadas en MI y PR.
 - Se identificaron QTL's asociados con % de N derivado de la atmósfera (Ndfa), índice de cosecha de N, el % de N en la biomasa y rendimiento de semilla y N.
 - Varios QTL's se asociaron con genes candidatos expresados en los nódulos y las raíces.

Nitrógeno derivado de la atmósfera (Ndfa)

- $\%Ndfa = (\delta^{15}N_{\text{reference plant}} - \delta^{15}N_{\text{fixing plant}}) / (\delta^{15}N_{\text{reference plant}} - B)$
- $Ndfa = N_{\text{total}} \times \%Ndfa$
 - $\delta^{15}N_{\text{reference plant}} = {}^{15}N$ in the no-nod, non-fixing plant
 - $\delta^{15}N_{\text{fixing plant}} =$ is the ${}^{15}N$ in the fixing plant
 - 'B' is the $\delta^{15}N$ of the same N fixing plant when grown in N-free conditions.

QTL para rendimiento de semilla y N en la población Puebla 152 x Zorro – Isabela, PR

Característica	Año	Cromosoma	Posición (Mb)	Marcador indicativo	Pico LOD	(R ² %) ¹	(Add) ²
Rend. N	2012	Pv03	39.5	ss715646619	3.1	11.1	-4.1
	2012	Pv04	1.7	ss715647821	3.8	13.2	4.3
	2012	Pv05	3.2	ss715648340	4.0	13.9	4.3
	2012	Pv09	25.2	ss715646059	3.2	12.6	4.4
Rend. semilla	2012	Pv03	39.6	ss715639345	3.2	14.6	-138.8
	2013	Pv03	39.4	ss715646621	3.1	12.1	-192.9

¹ Porcentaje de la variación fenotípica explicada por el QTL.

² Valores positivos indican que el alelo vino de Puebla 152 y valores negativos indican que el alelo vino de Zorro.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

- Coale et al. (1985) lograron aumentar el total de N y la cantidad de N₂ fijado de líneas de soya por medio de la selección para mayor rendimiento de semilla y sin dar atención especial a la fijación de N₂. (BASE 120 - línea B14311 de Dr. Kelly).
- El Dr. Rosas ha tenido éxito utilizando selección recurrente para desarrollar frijol con FBN superior y mejor adaptación a los suelos de baja fertilidad (acumular los alelos deseables para una característica).
- Una prioridad debe ser el desarrollo de marcadores que permitan la selección de líneas de frijol con nodulación superior o mayor fijación de N₂ (Graham et al., 2004).

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

2. Mejor adquisición de N y eficiencia agronómica.
 - Selección de líneas de frijol que tienen un mejor rendimiento en suelos bajos en N.
 - Selección de líneas de frijol que tienen una mejor eficiencia agronómica (mayor respuesta en rendimiento con la aplicación de fertilizante que contiene N).

	2007			2008		
Genotipo	Rendimiento NPK (kg/ha)	Rendimiento -N (kg/ha)	Eficiencia agronómica (kg/kg)	Rendimiento NPK (kg/ha)	Rendimiento -N (kg/ha)	Eficiencia agronómica (kg/kg)
PR0443-151	2544	1707	18.8	1918	1461	6.8
IBC 309-23	2184	1258	25.8	1460	950	13.7
PR0340-3-3-1	2270	820	31.0	2300	2065	7.6
Promedio del ensayo	1871	941		1199	837	

Eficiencia agronómica = [(Rendimiento + NPK) – (Rendimiento – N)] / kg de N aplicado

Fuente: Dorcinvil et al. 2010. Agronomic performance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines in an Oxisol. *Field Crops Res.* 118:264-272.

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

3. Incremento de la fijación biológica de nitrógeno

- El número y la masa de nódulos son generalmente inversamente relacionados.
- Una línea nodulada de forma ineficaz puede tener muchos nódulos pequeños
- Masa (peso) de los nódulos por planta es un indicador más útil del potencial simbiótico (Graham et al., 2004).

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

3. Incremento de la fijación biológica de nitrógeno
 - Seleccionar líneas de frijol que tienen una nodulación preferencial con cepas más eficientes de *Rhizobium* (Rosas et al., 1998).
 - Seleccionar líneas de frijol que son más promiscuas 'ICA Pijao' y *Bradyrhizobium* (Vargas, 2016).
 - Mayor longitud y densidad de los pelos radiculares - sitios de colonización de *Rhizobium*

Características de las plantas que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

- Iniciación de nodulación más temprano ampliaría el período de fijación de N_2 y podría reducir la dependencia de la fertilización nitrogenada.
- Se ha observado variación entre cultivares de frijol para características que afectan la nodulación temprana. (Chaverra y Graham, 1992).
- Esta es una característica importante si el objetivo es seleccionar frijol que combina maduración temprana con buena fijación biológica de nitrógeno.

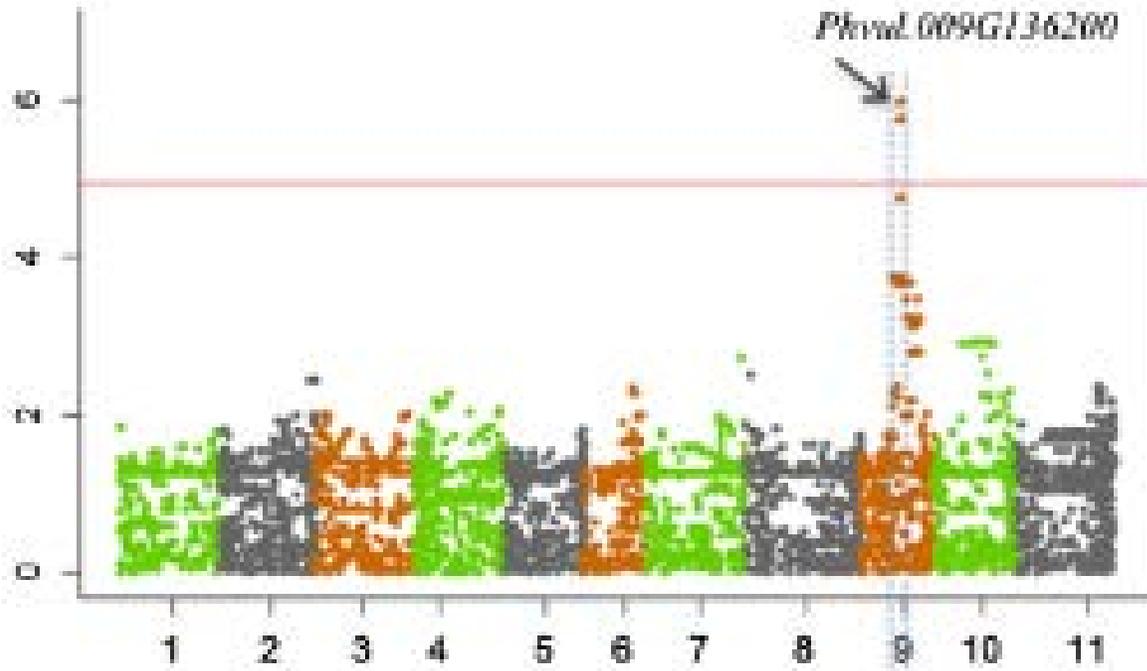
Características de *Rhizobium* que contribuyen a la adaptación a los suelos con bajo contenido de N

- Cepas de *Rhizobium* utilizadas en inoculante tienen que persistir en el suelo y competir con las cepas nativas para contribuir a la fijación biológica de nitrógeno.
- *R. tropici* es más tolerante al calor y suelos ácidos. La cepa CIAT 899 ha sido ampliamente evaluada en estudios de inoculación.

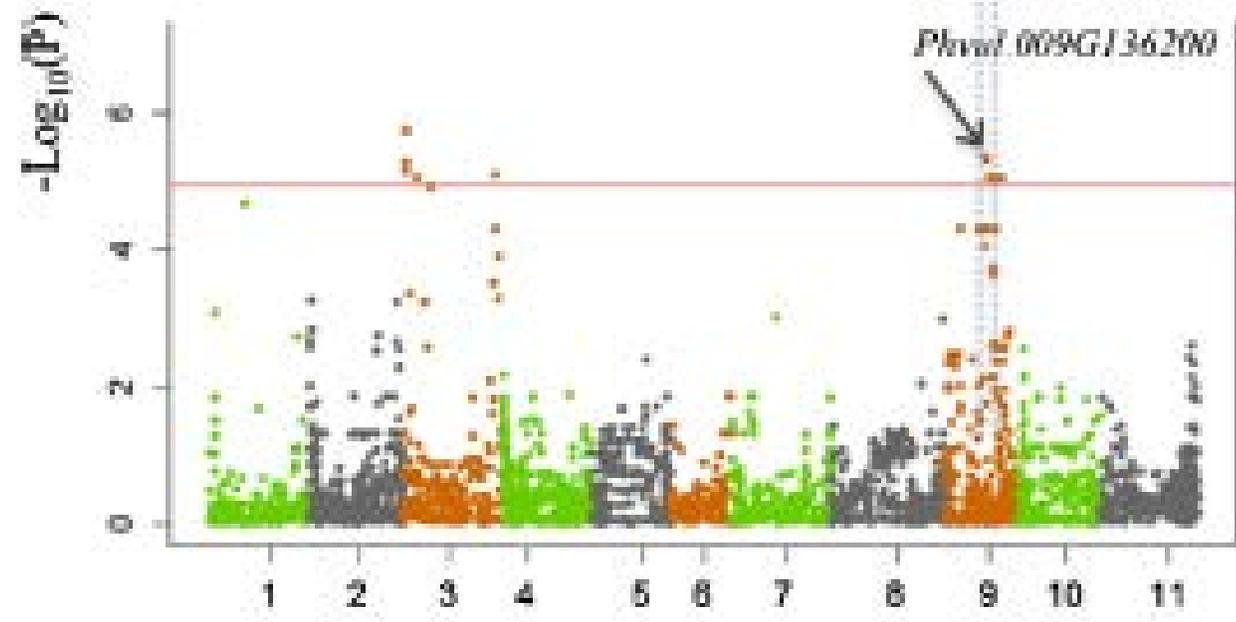
El desarrollo de frijol con mayor capacidad de fijación biológica de nitrógeno (FBN) y tolerancia a los suelos con bajo contenido de P requerirá varios ciclos de selección y la selección asistida por marcadores

- Nodulación y la fijación de N₂ generalmente son características de herencia cuantitativa (Graham et al., 2004)
- O'Rourke et al. (2014) midieron los patrones de expresión génica de frijol con tres fuentes de nitrógeno (-N, NO₃, N₂) para entender mejor los cambios debidos a la nodulación, desarrollo de la semilla, y la utilización de nitrógeno en las etapas importantes de desarrollo de la planta.
 - Análisis del tejido de las hojas de las plantas (+ N) identificaron 116 genes que se expresaron diferencialmente entre fuentes de nitrógeno (NO₃ vs N₂).

- Kamfwa et al. (2015) realizaron un estudio de asociación de genoma completo (GWAS) para explorar la variación genética y las características relacionadas con la fijación simbiótica de nitrógeno de la Colección de Diversidad de Frijol Andino (ADP).
- Polimorfismos de un sólo nucleótido (SNPs) significativos fueron identificados en los cromosomas Pv03, Pv07 y Pv09 de nitrógeno derivado de la atmósfera (Ndfa) en el tallo durante la floración, y por Ndfa en la semilla.
- Se identificaron dos genes candidatos relacionados con la formación de nódulos.



Lectura de nodulacion del campo



Ndfa de semilla del campo

Cromosoma

Kamfwa et al. (2015)

Tolerancia al aluminio

- Blair et al. (2009) reportaron que, bajo condiciones hidropónicas, los genotipos Andinos eran más tolerantes al aluminio que los genotipos de Mesoamérica.
- Las líneas tolerantes al aluminio, tenían en presencia de Al en la solución de nutrientes, una menor disminución en la tasa de elongación de la raíz primaria y una mayor longitud total de la raíz y un menor aumento de diámetro de la raíz.
- Otro mecanismo que se ha correlacionado con una mayor tolerancia al Al es la exudación de ácidos orgánicos por los ápices de las raíces (Rangel et al., 2010).

Tolerancia al aluminio

- López-Marín et al. (2009) evaluaron líneas endogámicas recombinantes del cruzamiento DOR 364 x G 19833.
- Reportaron que las características de las raíces expresadas bajo el estrés de Al están bajo control poligénico.
- Se encontraron un QTL en la misma región genómica, donde se ha reportado un QTL para tolerancia a bajos niveles de P.

Característica	Adaptación a los suelos bajos en N	Adaptación a los suelos bajos en P	Tolerancia al Al
Resistencia a las pudriciones de las raíces	+	+	+
Nodulación temprana	+		
Mayor peso de los nódulos	+		
Mayor adquisición de los nutrientes del suelo	+	+	
Mejor reparto de los nutrientes dentro de la planta	+	+	

Característica	Adaptación a los suelos bajos en N	Adaptación a los suelos bajos en P	Tolerancia al Al
Mayor densidad y longitud de los pelos radicales	+	+	+
La exudación de ácidos orgánicos de las raíces		+	+
Marcador QTL	+	+	+
Ángulo de crecimiento poco profundo de las raíces basales	+	+	
Mayor número de verticilos radicales (BRWN)		+	

¿Preguntas?

- ¿Existe una línea de frijol que tiene raíces poco profundas, con pelos radiculares largos y densos y un mayor número de verticilos radiculares?
- ¿Qué línea de frijol en su país tiene la mayor tolerancia a la baja fertilidad de suelo?
- ¿Qué tipo y cantidad de la fertilización se recomienda para la producción de frijol en su país?