

Una mirada agronómica en el uso de biológicos para la nutrición de los cultivos

► ► Salvagiotti F. ^{1 2*}

¹ Grupo Manejo de Cultivos, Suelos y Agua – EEA Oliveros INTA – Santa Fe.
² CONICET.

✉ salvagiotti.fernando@inta.gob.ar

>. LA DEMANDA DE NUTRIENTES POR LOS CULTIVOS Y LA BRECHA NUTRICIONAL

La demanda de nutrientes de los cultivos está en función de la biomasa producida, del rendimiento de los cultivos y de la composición química de los granos. En la Tabla 1 se puede observar la demanda de N, P, K y S para soja, maíz y trigo. Esta demanda esta expresada en la cantidad de nutriente que el cultivo debe absorber para producir una tonelada de rendimiento (requerimiento de nutrientes, o su inversa la eficiencia en el uso del nutriente). Para cada cultivo y nutriente existe un rango de eficiencias. Si bien usualmente se utiliza una eficiencia promedio en el uso de los nutrientes, según las condiciones ambientales los cultivos pueden expresar la máxima producción con un determinado nivel de nutriente (eficiencia máxima) o por el contrario con ese nivel de nutrientes no alcanzar la producción deseada por efecto de algún tipo de stress (eficiencia mínima). En consecuencia, así como según las condiciones ambientales de un sitio existe una probabilidad de ocurrencia de rendimiento, también habrá una probabilidad de ocurrencia de eficiencias en el uso de los nutrientes que oscilará entre los máximos y mínimos tal como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1 – Requerimiento máximo, mínimo y promedio de N, P, K y S para maíz, trigo y soja.

		Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Azufre
		Kg nutriente por tonelada de rendimiento			
Maíz *	Máxima	14	1.8	9	-
	Promedio	18	2.7	20	-
	Mínima	33	5.4	38	-
Trigo **	Máxima	17	2.6	16	-
	Promedio	24	3.6	26	-
	Mínima	39	6.0	45	-
Soja ***	Máxima	54	3.6	14	2.5
	Promedio	68	6.8	40	4.2
	Mínima	87	10.9	63	6.8

* Setiyono et al (2010); ** Pathak et al (2003), Liu et al (2006); *** Salvagiotti et al (2021).

Existen brechas de rendimiento en los principales cultivos de Argentina que pueden ser cerradas con prácticas de manejo (Aramburu Merlos et al, 2015). Parte de esta brecha esta explicada por el manejo nutricional de los cultivos. Esta brecha nutricional está determinada por la capacidad de los suelos de brindar los nutrientes necesarios, el potencial de producción de los cultivos en un ambiente determinado y el nivel de fertilización actual utilizado en cada lote. En el caso de las leguminosas, hay que sumar, para el caso del nitrógeno, el aporte de la fijación simbiótica. Existen otras fuentes de nutrientes para los cultivos como el aporte de N de relaciones asociativas (fijadores libres o endófitas) o potencialmente se ha sugerido el aporte de P o K a través del uso de microorganismos solubilizadores de P y K inorgánico u orgánico del suelo. Sin embargo, la magnitud del aporte de estas fuentes de nutrientes y su rol para el cierre de las brechas de rendimiento no ha sido abordado. **Es necesario una mirada desde la agronomía para conocer el impacto real de estas fuentes de nutrientes.**

>. PROMOCIÓN DEL CRECIMIENTO

En condiciones controladas se ha observado que diferentes bacterias pueden producir efectos que podrían favorecer el crecimiento de las plantas, comúnmente llamados por sus siglas en inglés como PGPR (*plant growth promoting rhizobacteria*) o el nombre más general para abarcar otros microorganismos (PGPM). Este efecto promotor puede ser directo o indirecto a través de diversos procesos como la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, la síntesis de hormonas, sideróforos, la solubilización de fuentes poco solubles de fosfatos o potasio o por el biocontrol ya sea por antagonismo, parasitismo, o la supresión de organismos perjudiciales (Timofeeva et al, 2023).

Uno de los casos más conocidos entre los microorganismos que producen promoción del crecimiento vegetal es el de *Azospirillum* sp, habiendo sido más estudiado en cereales como trigo y maíz. En el caso de trigo, Diaz-Zorita y Fernandez- Canigia (2009) mostraron incrementos del 5% en el rendimiento por el efecto promotor de *Azospirillum argentinense* (Figura 1). Los efectos más destacados sobre el cultivo fueron sobre la implantación y crecimiento temprano, como por ejemplo la biomasa aérea y de raíces al momento del macollaje (Z2.3 a Z2.5), con incrementos del 9 y 11%, respectivamente respecto del tratamiento sin inocular. Estos autores han mostrado como la magnitud de la respuesta depende de diversos factores del manejo del sistema de los cultivos y de los sistemas de producción (labranzas, cultivos previos) o el manejo de la fertilización. En general, las mayores respuestas se han obtenido cuando los cultivos tenían condiciones para un mejor crecimiento.

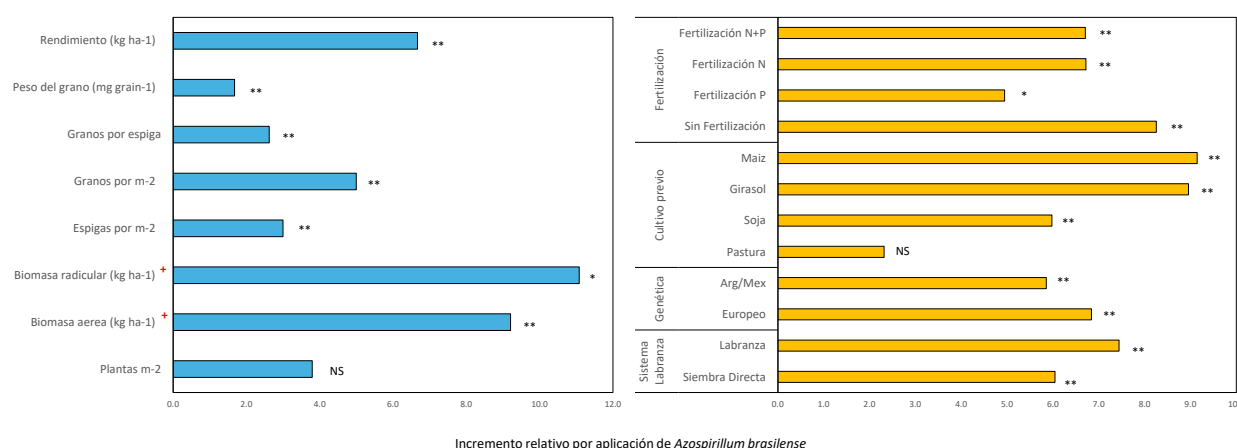


Figura 1 – Incremento relativo de distintas variables relacionadas con el crecimiento y la producción de trigo por la adición de *Azospirillum argentinense* en la región pampeana argentina. + Biomasa aérea y radicular en macollaje (Z 2.3-Z 2.5); NS (no significativo), * (P<0.10), ** (P<0.05) (Adaptado de Diaz- Zorita & Fernandez-Canigia, 2009)

>. FIJACIÓN SIMBIÓTICA Y NO SIMBIÓTICA DE NITRÓGENO

Las bacterias diazotróficas tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Estos microorganismos poseen el complejo enzimático de la nitrogenasa, que entre otras variantes, es una ferro-molibdo-proteína que permite romper el triple enlace de la molécula de N_2 . Estos organismos son tanto simbióticos como no simbióticos (también llamados de “vida libre”), autótrofos o heterótrofos (Tabla 2).

La magnitud del aporte de nitrógeno es mucho mayor cuando se trata del aporte simbiótico, en relación del aporte de los organismos asociativos. En el caso de los primeros, a escala global se ha estimado un aporte superior a los 100 kg N ha⁻¹ ya sea incluyendo cultivos de grano como pasturas leguminosas (Tabla 3). Este aporte es variable según la leguminosa y las condiciones edafoclimáticas de cada región y los sistemas predominantes. En general, el aporte de N a través de la fijación simbiótica es mayor en la medida que el crecimiento del cultivo hospedante sea mayor.

En el caso de la fijación no simbiótica de N, numerosas especies han sido identificadas (Tabla 2). A escala global se ha mostrado que el aporte de N es menor a los 10 kg ha⁻¹ (Herridge et al, 2008; Ladha et al, 2016) (Tabla 3).

Tabla 2 - Diazótrofos asociativos y simbióticos (con su hospedante) de importancia en agricultura (tomado de Ladha et al, 2022)

No simbióticos				Simbióticos			
Heterótrofos		Autótrofos		Heterótrofos		Autótrofos	
				Hospedante		Hospedante	
Aeróbicos	Azotobacter Azospirillum Azoarcus Beijerinckia Rhizobium	Cyanobacteria	Gloeocapsa Thichodesmium Nostoc Anabaena Calothrix	<i>Azorhizobium</i>	Sesbania	<i>Anabaena</i>	Azolla
				<i>Bradyrhizobium</i>	Maní, Soja, Frijol, Lupino		
				<i>Mesorhizobium</i>	Garbanzo, Astragalus		
				<i>Rhizobium</i>	Poroto, Arveja, Arveja, Vicia, Habas, Habas, <i>Lathyrus</i> sp		
				<i>Sinorhizobium</i> (<i>Sinorhizobium meliloti</i>)	<i>Medicago</i> sp, alfalfa, Sesbania,		
Anaeróbicos Facultativos	Bacillus Clostridium Desulfotomaculum Thiobacillus Thiobacter Erwinia	Bacterias fotosintéticas	Rhodospirillum Rhodospseudomonas Chromatium Chlorobium				
Anaeróbicos	Clostridium Sulfovibrio						

Tabla 3 - N fijado anualmente a escala global por organismos simbióticos y no simbióticos en distintos cultivos (Adaptado de Herridge et al, 2008)

Agente	Tipo relación	Cultivo/ Sistema	Tasa anual de aporte de N
			Kg N ha ⁻¹ año ⁻¹
Rizobio - Leguminosa	Simbiótica	Cultivos leguminosos anuales	115
Rizobio - Leguminosa	Simbiótica	Pasturas/ Legumbres para pastoreo	110-127
Azolla (microhelecho) en simbiosis con una Cianobacteria	No simbiótica	Arroz	33
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Caña de azúcar	25
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Otros cultivos no incluyendo leguminosas o arroz	<5
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Sabanas tropicales utilizadas para pastoreo	< 10

En Argentina, en promedio la contribución de la fijación biológica de nitrógeno de las distintas leguminosas que se cultivan en el país oscila entre 40 y 60% del total absorbido por la planta. En términos absolutos el mayor aporte lo realiza alfalfa, con un promedio de 200 kg N por ha año proveniente de la fijación biológica seguido por soja (Tabla 4).

Tabla 4 - Nitrógeno absorbido total en biomasa aérea (Nt) y contribución de la Fijación Simbiótica (N-FBN) para diferentes cultivos leguminosos en Argentina. Entre paréntesis, el percentil 25 y 75 de la distribución de la información.

	FBN	N – FBN	N absorbido	Fuente
	(%)	kg N ha ⁻¹		
Soja	59 (46-71)	148 (98-197)	210 (170-268)	Collino et al, 2015
Arveja	64 (53-84)	51 (15-74)	84 (60-112)	Enrico et al, 2020
Vicia	61 (44-78)	89 (51-115)	151 (100-184)	Enrico et al, 2020
Alfalfa	53 (42-66)	872 (408-1396)	1645(772-2200) *	Racca et al, 2001
Maní	52 (43-64)	138 (119-188)	293 (258-315)	Palmero, 2023

* Promedio de pasturas de 4 años de duración

La inoculación de los cultivos en consecuencia cobra un rol fundamental para el manejo del nitrógeno cuando se incluyen leguminosas en una secuencia de cultivos y es el manejo de productos biológicos de mayor impacto. Este impacto será de mayor magnitud en la medida que la leguminosa en cuestión no sea cultivada frecuentemente. En la Figura 2 se observan mayores incrementos relativos cuando los años de cultivo de la leguminosa son menores. Díaz Zorita y Baliña (2004) informaron para maní repuestas a la inoculación del 7% cuando los cultivos de maní venían de una historia de inoculación en el lote y del 25%

cuando el cultivo se implantaba por primera vez. Haciendo la misma comparación, Peticari et al (2019) observaron incrementos del 8 y 50% por la inoculación en campos con y sin historia sojera, respectivamente. De todos modos, la interacción con el año y las condiciones de crecimiento del cultivo harán variar la magnitud de la respuesta.

Muchas veces no se observan diferencias en ambientes rotados con la misma leguminosa en la producción (de materia seca o de granos) pero si en variables asociadas a la nutrición nitrogenada del cultivo por la mayor eficiencia de las cepas incorporadas en los inoculantes. En consecuencia, es de vital importancia que el desarrollo de los inoculantes sea con las cepas específicas para cada cultivo, con alta eficiencia simbiótica y que se respeten las dosis de inoculante recomendada por el fabricante para asegurar la distribución homogénea de las bacterias en las semillas.

El manejo de la inoculación de las leguminosas no sólo se verá en el corto plazo (durante el ciclo del cultivo) sino sus efectos en los cultivos sucesores como doble cultivos. El efecto del mayor aporte de N de la vicia inoculada se vio reflejado en el cultivo de maíz de siembra tardía que fue sembrado sobre ella. No se observaron incrementos significativos en el rendimiento cuando el maíz se sembró sobre un cultivo de vicia inoculada (Figura 3), sin embargo, las mayores respuestas a la fertilización con N se observaron cuando vicia y arveja (que también fue evaluada en el experimento) no fueron inoculados, con incrementos entre el testigo y la dosis máxima de N que varió entre 2450 y 2691 kg ha⁻¹ (30 y 35%, en términos relativos) para vicia y arveja, respectivamente. Estos resultados muestran la relevancia del manejo del nitrógeno en el sistema de producción a través de la inoculación de las leguminosas invernales en suelos sin historia previa de vicia o arveja (Enrico et al, 2020).

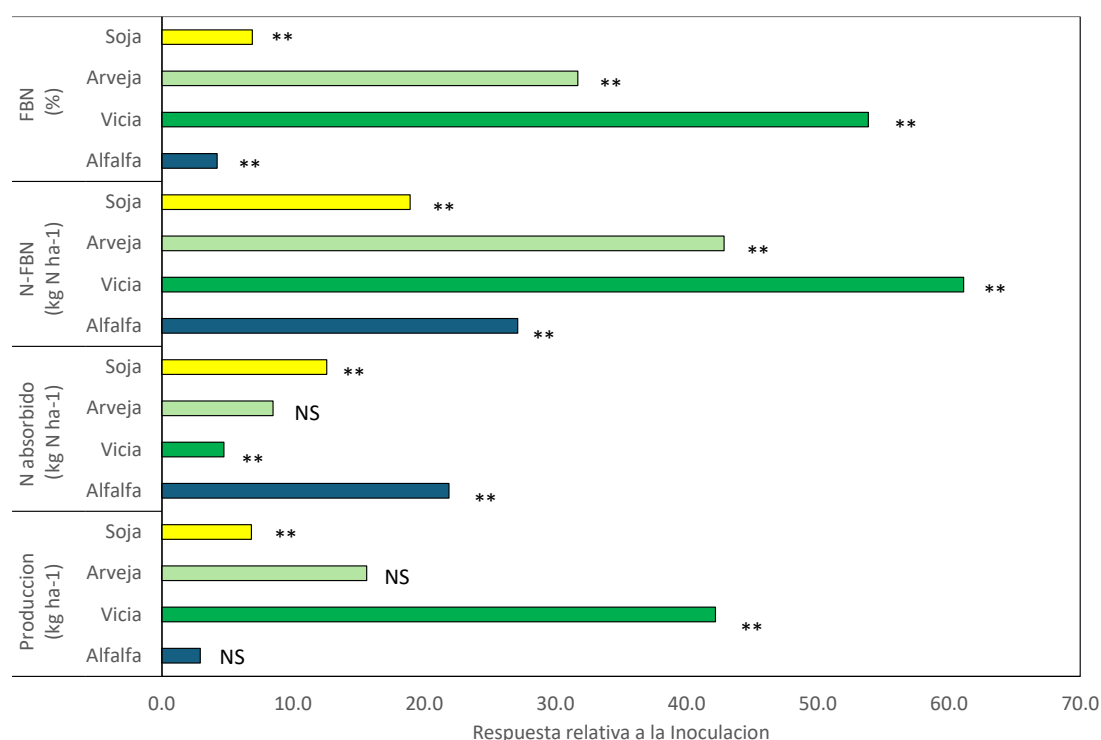


Figura 2 – Producción, N absorbido, N derivado de la fijación biológica de N y proporción derivada de esta fuente en respuesta a la inoculación en alfalfa, vicia, arveja y soja.

Soja: promedio de 9 ensayos en lotes con historia sojera (Piccinetti et al, 2011)

Vicia y Arveja: promedio de 2 ensayos en lotes sin historia con cultivo de vicia (Enrico et al, 2020)

Alfalfa: promedio de pasturas de tres años de duración en 2 sitios (Racca et al, 2013)

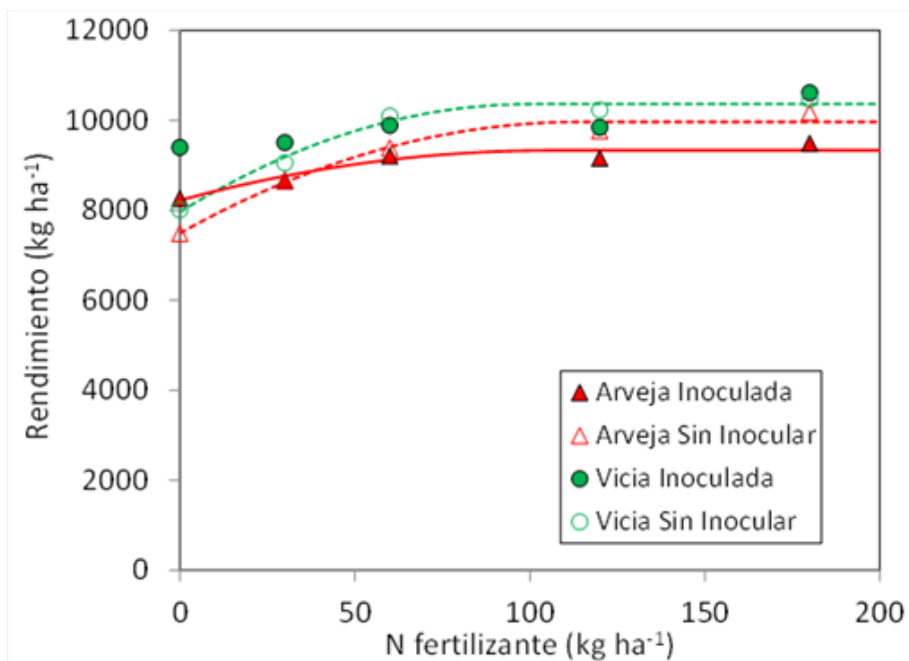


Figura 3 - Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado aplicado y el rendimiento en maíz sembrado sobre dos antecesores (arveja y vicia) con y sin la aplicación de inoculantes en estos antecesores. Las líneas indican el ajuste cuadrático-plateau a los tratamientos en donde hubo efecto significativo de la fertilización nitrogenada.

>. SOLUBILIZACIÓN DE FOSFORO Y POTASIO

Se han identificado numerosas especies de bacterias (en mayor proporción), hongos y actinomicetes con la capacidad de solubilizar fuentes poco solubles de fosfatos del suelo. Estos microorganismos se han encontrado en la rizosfera de las plantas y la solubilización está asociada a la liberación de ácidos orgánicos que acidifican la zona de la rizosfera. Una bacteria se la identifica como solubilizadoras de fósforo o potasio evaluándolo *in vitro* en pruebas de concepto sobre medios de cultivo específicos y distintas fuentes de P). En el caso de la evaluación de la solubilización de potasio se utiliza como fuente polvo de mica. Cuando se observan zonas más claras alrededor de las colonias de bacterias, estableciendo los índices de solubilización utilizados para comparar capacidades de solubilización entre microorganismos en los procesos de selección. También se utilizan métodos para determinar las tasas de solubilización dando una idea de las posibilidades de aporte.

Si bien numerosas bacterias y hongos han sido identificados con esta capacidad, no se han encontrado evidencias que muestren que haya un aporte neto desde las bacterias a la nutrición de las plantas. Es decir, los mecanismos de solubilización identificados *in-vitro* que permitirían satisfacer la demanda de estos nutrientes por parte de las bacterias, no las podemos trasladar directamente a la nutrición con P o K de las plantas a escala del cultivo debido a las complejas interacciones que ocurren en el sistema suelo-planta aunque se pueden utilizar variables indicadoras como el contenido de P en las estructuras vegetales (Raymond et al, 2021). Sería necesario en el futuro ver el rol en largo plazo de este tipo de organismos sobre la nutrición con P o K en las secuencias de cultivos.

>. CONCLUSIONES

Desde una perspectiva agronómica, en donde se busca hacer el manejo más sustentable de la producción de los cultivos y de los sistemas de producción, buscando cerrar brechas de producción, el manejo de la nutrición de los cultivos es altamente relevante. La incorporación de productos de origen biológico que con sus mecanismos microbianos complementen la nutrición de los cultivos mejorando las eficiencias de su uso, puede ser muy relevantes. Desde esta perspectiva la inoculación de leguminosas es la práctica de mayor impacto productiva y económica por la cantidad de nitrógeno que se puede incorporar a los sistemas a través de la fijación simbiótica. El aporte de la simbiosis fijadora de Nitrógeno será de mayor magnitud en la medida que haya mejores condiciones para la producción de biomasa que estarán ligadas a mayor absorción de N.

El aporte de nitrógeno de microorganismos asociativos tiene un rol relativamente menor. Sin embargo, el rol de estos microorganismos está relacionados a sus variados mecanismos PGPR que favorecen su crecimiento y tolerancia a diferentes factores bióticos y abióticos. En la mayoría de los casos la promoción del crecimiento está más relacionadas al conjunto de mecanismos microbianos que sólo a cada uno por separado. En este sentido hay que destacar que aún no hay evidencias que demuestren el efecto directo de la solubilización de P por el mecanismo individualizado de las bacterias y un aporte directo medible a la nutrición fosfatada del cultivo.

Finalmente, es importante destacar que las prácticas a escala de sistema de producción recomendadas para la intensificación sostenible de la producción o la agricultura regenerativa como la planificación de las rotaciones de los cultivos, incluyendo diversas especies y ocupando el suelo con raíces (y rizósferas donde se desarrollan los microorganismos) la mayor parte del año es la clave para mantener la dinámica funcional del microbioma del suelo.

>. REFERENCIAS

Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145-154.

Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W., 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392, 239-252.

Díaz-Zorita, M., Baliña, R., 2004. Respuesta de cultivos de maní a la inoculación con *Bradyrhizobium* sp. *Ciencia del Suelo*, 22(1), 7.

Díaz-Zorita, M., Fernández-Canigia, M.V., 2009. Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *European Journal of Soil Biology* 45, 3-11.

Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvagiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *European Journal of Agronomy* 115, 126016.

Herridge, D., Peoples, M., Boddey, R., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil* 311, 1-18.

Ladha, J.K., Peoples, M.B., Reddy, P.M., Biswas, J.C., Bennett, A., Jat, M.L., Krupnik, T.J., 2022. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research* 283, 108541.

Liu, M., Yu, Z., Liu, Y., Konijn, N., 2006. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 245-258.

Palmero, F. 2023. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los balances de N de maní en Argentina. Tesis Master Science. Escuela de graduados – FAUBA.

Pathak, H., Aggarwal, P.K., Roetter, R., Kalra, N., Bandyopadhyaya, S.K., Prasad, S., Van Keulen, H., 2003. Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 105-113.

Perticari, A., Ventimiglia, L., Piccinetti, C. y Díaz-Zorita, M., 2019. Variabilidad regional y estacional de la inoculación de soja. *Actas MERCOSOJA* 2019.

Piccinetti, C.F., Enrico, J.M., Capurro, J., Murua, L.A., Martinez, L., Resch, J.F., Perticari, A., 2011. La inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* mejora la fijación biológica de N₂ y la producción del cultivo de soja en la región pampeana argentina. XXV Reunión Latinoamericana de Rizobiología, Uruguay.

Racca, R., Odorizzi, A., Arolfo, V., Balzarini, M., Basigalup, D., Brenzoni, E., Campillo, R., Cangiano, C., Collino, D., Correa, N., Dardanelli, J., De Luca, M., Gonzalez, N., Grassano, A., Labandera, C., Lagares, A., Perticari, A., Ronchi, A., Rosas, S., 2013. Contribución a una producción sostenible de alfalfa mediante el manejo de microorganismos rizosféricos en Argentina, Chile y Uruguay. Ediciones INTA, Buenos Aires

Racca, R., Collino, D., Dardanelli, J., Basigalup, D., Gonzalez, N., Brenzoni, E., Hein, N., Balzarini, M., 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA, Buenos Aires

Raymond, N.S., Gomez-Muñoz, B., van der Bom, F.J.T., Nybroe, O., Jensen, L.S., Muller-Stover, D.S., Oberson, A., Richardson, A.E., 2021. Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. *New Phytologist* 229, 1268-1277.

Salvagiotti, F., Magnano, L., Ortez, O., Enrico, J., Barraco, M., Barbagelata, P., Condori, A., Di Mauro, G., Manlla, A., Rotundo, J., Garcia, F.O., Ferrari, M., Gudelj, V., Ciampitti, I., 2021. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy* 127, 126289.

Setiyono, T.D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A., 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118, 158-168.

Timofeeva, A., Galyamova, M., Sedykh, S.E., 2023. Plant Growth-Promoting Soil Bacteria: Nitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Siderophore Production, and Other Biological Activities. *Plants (MDPI)* 12.