

FERTILIZACIÓN Y EFICIENCIA DE USO DE FÓSFORO EN SOJA Y MAÍZ EN EL CENTRO-OESTE BONAERENSE

Pérez, G.^{1*}; Díaz-Zorita, M.²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Agencia de Extensión Rural Bolívar, Olascoaga 70, (CP 6550) Bolívar, Buenos Aires, Argentina.

² Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, RN 35 km 334, (CP 6300), Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

*E-mail: perez.gonzalo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Las variaciones en propiedades edáficas y del terreno son algunos de los factores a considerar en la zonificación de sitios según sus relaciones con la producción de los cultivos. Kravchenko *et al.* (2000) concluyó que la combinación entre las propiedades de suelo y la topografía explican un 40 % de la variabilidad del rendimiento en cultivos de maíz y de soja en Illinois e Indiana (EEUU). La práctica de agricultura de precisión para el manejo de cultivos busca identificar sectores de producción con cualidades semejantes determinadas por factores topográficos y por características edáficas delimitando zonas de manejo (Hatfield *et al.*, 2000) y así adecuar el uso de insumos a cada unidad reconocida por su heterogeneidad dentro de los lotes de producción (Khosla *et al.*, 2002).

El fósforo (P) es uno de los nutrientes más importantes para la producción de los cultivos de soja y maíz, obteniendo respuestas con valores de P-Bray 1 o P extractable (Pe) en la capa de 0-20 cm por debajo de los 12 mg kg⁻¹ (Correndo *et al.*, 2018). Los niveles de Pe en suelos del centro oeste de la provincia de Buenos Aires se encuentran en rangos que van desde 10 a 20 mg kg⁻¹ (Sainz Rozas *et al.*, 2020). Presentando alta variabilidad espacial en el contenido de Pe, muestreado en la capa de 0-20 cm (Alesso *et al.*, 2012; Simon *et al.*, 2013). Para la región del centro oeste bonaerense, con suelos agrícolas en su mayoría Hapludoles típicos y énticos, la variabilidad espacial de los contenidos de Pe está fuertemente asociada a la variabilidad topográfica y a la productividad de los cultivos, presentando las zonas de mayor productividad menores contenidos de Pe (Pérez y Díaz-Zorita, 2018). La mayor parte del fósforo que absorben los cultivos se concentra en los granos y por lo tanto es exportado con las cosechas siendo la extracción continua sin reposición una de las formas directas de pérdida de fertilidad de los suelos (Cordell *et al.*, 2009).

El manejo de nutrientes sitio-específico es una tecnología que se sustenta en la capacidad de reconocer la

heterogeneidad de productividad de los cultivos y de niveles de nutrientes dentro del lote de producción y adecua el uso de insumos para cada unidad de manejo reconocida (Khosla *et al.*, 2002). Por lo tanto, es importante establecer las relaciones entre estos atributos de delimitación y los rendimientos de los cultivos para la eficiente aplicación de insumos en forma variable o con prácticas de manejo sitio-específicas.

La productividad de maíz y de soja varían según condiciones de sitio (ej. textura, profundidad del suelo, posición en el paisaje, etc.) y de manejo (ej. fecha de siembra, genotipos, etc.). Los indicadores de respuesta de los cultivos a la fertilización con fósforo varían según niveles extractables de este nutriente e interactúan con otras propiedades de sitio que explican también variaciones en productividad. Por lo tanto, identificar a nivel sitio específico las relaciones entre indicadores edáficos y de productividad vinculados con la respuesta de los cultivos a correcciones en la nutrición fosfatada puede contribuir a mejorar la recomendación sitio específica para la fertilización con este elemento.

El objetivo de este trabajo fue determinar las relaciones entre la eficiencia de uso del P y la respuesta a la fertilización con P en maíz y en soja según condiciones contrastantes de productividad entre zonas de manejo de los cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En 2 establecimientos del centro de la provincia de Buenos Aires con manejos representativos de sistemas agrícolas de la región subhúmeda pampeana se condujeron experimentos a campo en suelos clasificados como Hapludoles énticos. Dentro de cada lote se delimitaron zonas de manejo (ZM) de alta y baja productividad (AP y BP), utilizando mapas de topografía e índice verde (NDVI, Eq. 1) de cultivos anteriores.

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)^{-1} \dots\dots\dots Eq 1$$

dónde, IR es la reflectancia en la banda infrarroja y R es la reflectancia en la banda roja.

En total realizaron 6 estudios en cultivos de maíz y de soja, 4 durante la campaña 2013-2014 y 2 durante 2014-2015. Las fechas de siembra temprana fueron durante la primera semana de octubre (maíz) y la primera de noviembre (soja). En ambos cultivos, la siembra demorada o tardía se realizó durante la primera quincena de diciembre. Dentro de cada ZM se instalaron 3 dosis de fósforo: 0, 15 y 30 kg P ha⁻¹. El tratamiento de fertilización fue aplicado como superfosfato triple (0:46:0) en bandas en superficie a la siembra.

Los tratamientos se instalaron en franjas de 10 m de ancho por 100 m de largo, con un diseño de bloques aleatorizados con 3 repeticiones en cada lote y ZM. Previo a la siembra, y en cada lote y zona de manejo se realizó un muestreo compuesto de los suelos en la capa de 0 a 20

cm de profundidad. En las mismas se determinó: contenido de carbono orgánico (combustión húmeda) expresado como materia orgánica (MO) utilizando un factor de conversión de 1,724, fósforo extractable (Pe, método de Bray y Kurtz 1), pH en agua (método potenciométrico en relación suelo: agua 1:2,5), conductividad eléctrica (CE, conductimetría en relación suelo: agua 1:2,5), contenido de arena (método de Bouyoucus).

La cosecha para la evaluación de la producción de granos se realizó en forma manual, recolectando una superficie de 3 m² con 3 submuestras separadas de forma equidistante dentro de cada franja.

La eficiencia de uso de fósforo (EUP), expresada en kg de granos por kg de P aplicado, se calculó a partir de la siguiente ecuación (Eq. 2):

$$EUP = [(Rendimiento_{maxP} - Rendimiento_{testigo}) (Dosis P)^{-1}] \dots \dots \dots Eq.2$$

dónde, Rendimiento_{maxP} es el rendimiento de la parcela de máximo rendimiento fertilizado con P dentro de cada bloque, Rendimiento_{testigo} es la parcela dentro del bloque sin fertilización con P, y Dosis P es la dosis del tratamiento fertilizado con P. Tanto los rendimientos como la dosis aplicada de P se expresaron en kg ha⁻¹.

Los análisis de los resultados de rendimientos y de la EUP se realizó según la metodología propuesta por Peralta *et al.* (2021), a partir de modelos lineales mixtos, utilizando para cada lote la dosis de P y la ZM como efectos fijos, y el bloque, dentro de cada ZM, como efecto aleatorio. Se utilizó el paquete estadístico de MLGM de Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la campaña 2013-2014 las precipitaciones durante el período de septiembre a marzo fueron de 478 mm, 169 mm menos que el promedio histórico para la zona, gran parte de las mismas se concentraron durante el mes de febrero (139 mm). Durante la campaña 2014-2015 las precipitaciones durante el período de septiembre a marzo fueron de 490 mm, 156 mm menos que la media histórica.

Las zonas de manejo de alta productividad se ubicaron en posiciones bajas en el paisaje y presentaron en promedio valores mayores de MO (3,4 %) y CE (0,2 dS m⁻¹) y valores menores de Pe (12,5 ppm) y de arena (46,4 %), que las zonas de baja productividad (MO 2,0 % MO; CE 0,1 dS m⁻¹; Pe 25,6 ppm y arena 74 %). El valor de pH fue similar en promedio para ambas ZM (**Tabla 1**). Datos similares fueron encontrados por Zubillaga *et al.* (2006), para la zona de Vedia (Provincia de Buenos Aires).

Tabla 1: Análisis de los suelos (0 a 20 cm) previo a la siembra para cada lote, cultivo y zona de manejo por productividad (ZM). DE = Desvío estándar, MO = Materia orgánica, Pe = Fosforo extractable, CE = Conductividad eléctrica.

Lote	Cultivo	ZM	MO (%)	Pe (ppm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	Arena (%)
LT 1	Maíz	Alta	3,7	14,5	5,8	0,25	46,5
LT 1	Maíz	Baja	2,1	27,3	5,7	0,17	71,0
Bar 1	Maíz	Alta	3,3	16,0	5,4	0,25	44,2
Bar 1	Maíz	Baja	1,5	36,3	5,6	0,11	78,8
LT 2	Maíz	Alta	3,5	13,5	6,3	0,26	42,5
LT 2	Maíz	Baja	2,1	29,2	6,1	0,10	81,1
LT 3	Soja	Alta	3,9	13,1	5,6	0,22	45,7
LT 3	Soja	Baja	2,2	13,2	5,4	0,13	67,9
Bar 3	Soja	Alta	3,3	9,6	5,4	0,20	59,2
Bar 3	Soja	Baja	2,5	12,1	6,5	0,22	70,8
Bar 4	Soja	Alta	2,8	8,2	5,5	0,19	40,2
Bar 4	Soja	Baja	1,6	35,5	5,4	0,15	74,4
Promedio (DE)	Alta		3,4 (0,4)	12,5 (3,0)	5,7 (0,3)	0,20 (0,03)	46,4 (6,7)
	Baja		2,0 (0,4)	25,6 (10,6)	5,8 (0,4)	0,10 (0,04)	74,0 (5,1)

En las zonas de manejo de AP el rendimiento medio de maíz, independientemente de la fecha de siembra, fue de 10.864 kg ha⁻¹ mientras que en promedio las ZM de BP alcanzaron 3.791 kg ha⁻¹. La mayor producción en las ZM de AP se atribuye tanto a la posición en el paisaje (áreas deprimidas, con mayor capacidad de almacenamiento

hídrico,) como a la mayor concentración de MO y menor contenido de arenas que en las ZM de BP (**Tabla 1**).

La fecha de siembra afectó los rendimientos solamente en BP: 1.287 kg ha⁻¹ en fechas de siembra tempranas y 6.296 kg ha⁻¹ en fechas de siembra tardías. Esta diferencia puede deberse a que en el mes de febrero (campaña 2013/14) ocurrieron precipitaciones abundantes (coincidiendo con el período crítico del cultivo).

En 3 de los lotes evaluados, el efecto de la interacción entre dosis de P aplicados y ZM no fue significativo. Esto significa que el efecto de la dosis de P sobre el rendimiento fue similar en ambas ZM. En Bar1temp.,

LT1temp. y LT2tard. Se observaron interacciones entre dosis de P y ZM, con respuestas al agregado de P en las ZM AP, y con bajos rendimientos medios en las zonas de BP (1687 kg ha⁻¹). En sitios con respuesta al agregado de P, se obtuvo un incremento medio de rendimiento de 1261 kg ha⁻¹. Esta respuesta estuvo asociada a sitios con un valor medio de Pe de 12,5 ppm. Esto es esperable debido a que están por debajo de valores críticos reportados para el cultivo de maíz de 17 ppm para la zona (Perez y Diaz-Zorita, 2018). No se observaron diferencias de rendimiento entre las dosis de P utilizadas (**Tabla 2**).

Tabla 2. Valores de probabilidad (p-valor) para la interacción entre dosis de fósforo (P) y zonas de manejo (ZM) de alta productividad (AP) y baja productividad (BP), y rendimiento de maíz, para los tratamientos de fertilización con fósforo (P), evaluados en 6 lotes de producción del centro oeste bonaerense. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas al 5%. ns = diferencias no significativas.

Sitio	Dosis de P * ZM	ZM	Dosis de P		
			0	15	30
	p-valor		Rendimiento (kg ha ⁻¹)		
Bar1tard.	ns	0,1	7.209 b	8.169 a	8.065 ab
LT1tard.	ns	0,08	8.232 b	8.646 ab	9.259 a
LT2temp.	ns	0,003	7.301	7.464	7.086
Bar1temp. AP	0,0016		7.554 b	9.225 a	9.464 a
Bar1temp. BP			1.012	404	358
LT1temp. AP	0,05		11.534 b	13.766 a	12.537 ab
LT1temp. BP			536	275	466
LT2tard. AP	0,0118		13.178 b	15.354 a	13.837 ab
LT2tard. BP			4.434	3.258	4.444
Promedio			6.777	7.396	7.280

En la zona de AP, los rendimientos de soja fueron en promedio de 4.945 kg ha⁻¹ superando a los observados en BP que fueron de 3.121 kg ha⁻¹. En AP y en BP la fecha de siembra temprana rindió que más que la tardía (4.596 kg ha⁻¹ vs 3.495 kg ha⁻¹ y 3.770 kg ha⁻¹ vs 2.471 kg ha⁻¹ respectivamente). En 5 de los lotes evaluados, el efecto de la interacción entre dosis de P y ZM no fue significativo. Esto significa que el efecto de la dosis de P sobre el rendimiento fue similar en ambas ZM. En Bar3temp. se observó interacción entre Dosis de P y ZM, con respuestas significativas en el sitio de AP. En sitios con respuesta al agregado de P, se obtuvo un incremento medio de rendimiento de 561 kg ha⁻¹. No se observaron diferencias de rendimiento entre las dosis de P utilizadas (**Tabla 3**).

En 5 de los lotes de maíz evaluados existieron diferencias significativas en la EUP entre zonas de manejo, siendo las ZM AP las de mayor EUP con un valor medio de 38 kg grano kg P⁻¹, en comparación con las ZM de BP, con un

valor medio de 80 kg grano kg P⁻¹ (Tabla 5). Estos resultados justificarían el uso de dosis diferentes de P en diferentes ZM, en el cultivo de maíz (**Tabla 4**).

En 2 de los lotes evaluados en soja, existieron diferencias significativas en la EUP entre zonas de manejo, siendo las ZM AP las de mayor EUP con un valor medio de 19 kg grano kg P⁻¹. Resultados similares fueron reportados por Peralta et. al. (2021), en lotes del sudoeste de Buenos Aires, en el cultivo de soja. En 4 de los lotes evaluados, la EUP, no se diferenció entre ZM. (**Tabla 5**).

Respuesta y productividad de los cultivos

La respuesta al agregado de fósforo en el cultivo de soja presentó un valor medio de 488 kg ha⁻¹, mientras que para maíz fue de 1.013 kg ha⁻¹. El rendimiento máximo puede considerarse como rendimiento potencial para cada uno de los sitios de estudio. La respuesta relativa al agregado de fósforo presentó correlación con el

rendimiento máximo en soja no así para maíz (**Figura 1**) Resultados similares fueron encontrados por Correndo (2018), en el cultivo de soja, en clases texturales finas,

difieren de lo reportados por Peralta et al. (2021), para lotes ubicados en el sudeste bonaerense.

Tabla 3. Valores de probabilidad (p-valor) para la interacción entre dosis de fósforo (P) y zonas de manejo (ZM) de alta productividad (AP) y baja productividad (BP), y rendimiento de soja (kg ha⁻¹), para los tratamientos de fertilización con fósforo (P), evaluados en 6 lotes de producción del centro oeste bonaerense. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas al 5%.

Sitio	Dosis de P * ZM	ZM	Dosis de P		
			0	15	30
	p-valor		Rendimiento (kg ha⁻¹)		
LT3temp.	ns	ns	3.823 b	4.473 a	4.495 a
LT3tard.	ns	ns	3.093	3.119	3.051
Bar4temp.	ns	ns	4.921 b	5.442 a	5.723 b
Bar4tard.	ns	ns	3.947 b	4.347 a	4.418 a
Bar3tard.	ns	0,035	1.709	1.775	1.846
Bar3temp. AP	0,055		3.227 b	3.759 a	3.611 ab
Bar3temp. BP			2.650	2.409	2.415
Promedio			3.980	4.505	4.562

Tabla 4. Valores de probabilidad (p-valor) y eficiencia de uso de fósforo (EUP, kg grano kg P⁻¹), evaluadas en 6 lotes de producción de maíz del centro oeste bonaerense.

Sitio	p-valor	EUP (kggrano kgP ⁻¹)	
		AP	BP
Bar1temp.	0,004	71	-20
Bar1tard.	ns	41	42
LT1temp.	0,001	114	-2
LT1tard.	0,030	77	2
LT2temp.	0,020	49	-25
LT2tard.	0,050	87	-10
Promedio		73	-2

Tabla 5. Valores de probabilidad (p-valor) y eficiencia de uso de fósforo (EUP, kg grano kg P⁻¹), evaluadas en 6 lotes de producción de soja del centro oeste bonaerense.

Sitio	p-valor	EUP (kggrano kgP ⁻¹)	
		AP	BP
Bar1temp.	0,01	27	3
Bar1tard.	0,10	12	6
LT1temp.	ns	33	26
LT1tard.	ns	18	12
Bar2temp.	ns	39	33
Bar2tard.	ns	26	23
Promedio		26	17

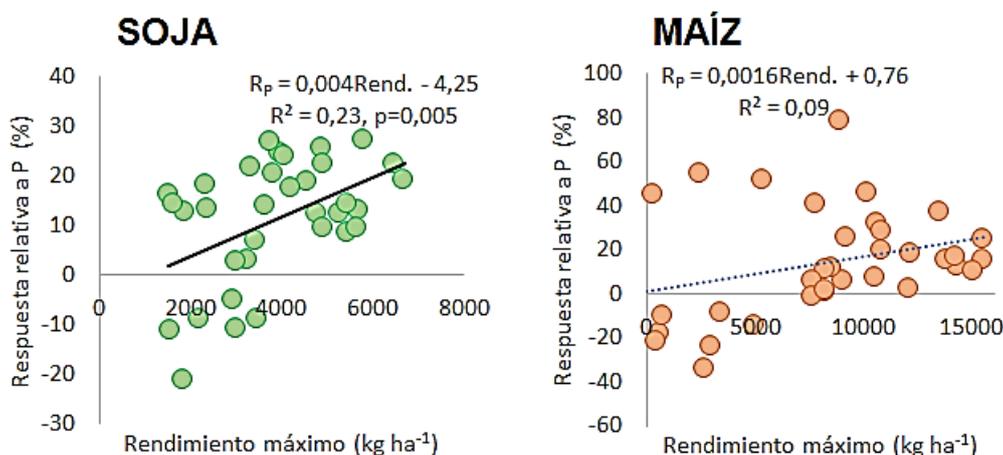


Figura 1. Respuesta relativa de soja y de maíz a la fertilización con fósforo según los rendimientos máximos de cada sitio.

La EUP presentó correlación positiva con el rendimiento máximo en ambos cultivos (soja= $r^2:0,47$; maíz= $r^2:0,64$), (Figura 2). Esto se debe posiblemente a mayor P_e en los lotes de menor productividad, por lo tanto, a una menor respuesta al agregado de P en estos sitios. Esta relación

puede ser utilizada como complemento de los niveles de P_e , para definir la dosis de P en los cultivos de soja y maíz en lotes del centro oeste bonaerense, en los que previamente se defina la productividad potencial de cada sitio.

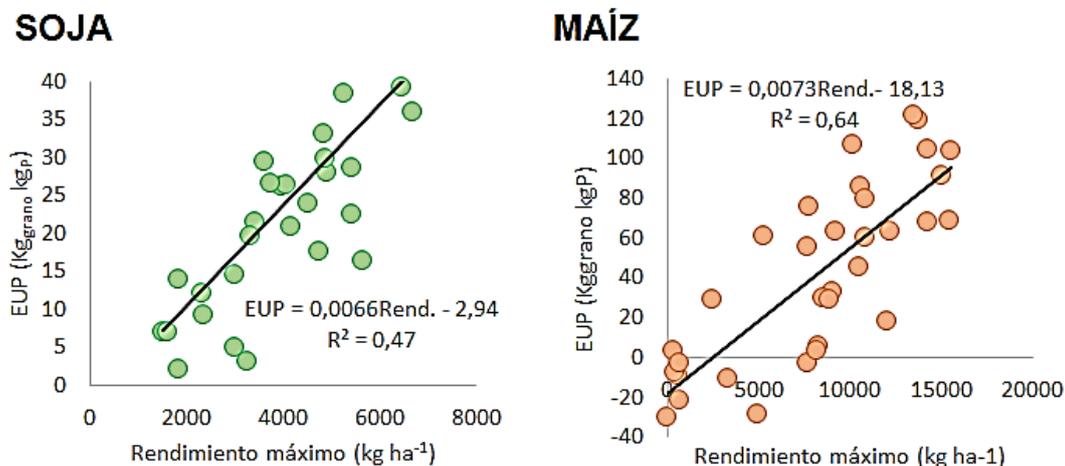


Figura 2. Eficiencia de uso de fósforo (EUP, kg grano kg P⁻¹), según los rendimientos máximos de cada sitio

Conclusiones

La EUP en soja y en maíz es mayor al aumentar el rendimiento potencial de cada sitio, posiblemente a que estos sitios son los que poseen menor contenido de P_e . Para el cultivo de maíz en la mayoría de los sitios, se observó diferentes EUP entre ZM, lo que justificaría dosis distintas de este nutriente. El rendimiento potencial del sitio, principalmente en soja, es un factor para considerar al describir respuestas esperables al fertilizar con fósforo.

Agradecimientos

A los establecimientos: EEA “Domingo y María Barnetche Bolívar” y “Los Tambos” por el uso de lotes y maquinaria

agrícola y la desinteresada colaboración de sus empleados.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, CA; MA Pilatti; SC Imhoff & M Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana santafesina. *Ciencia del suelo* 30:85-93.
- Cordell, D; JO Drangert & S White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.* 19: 292-305. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Correndo, A. A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a

la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana (Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires).

- Di Rienzo, JA, F Casanoves, MG Balzarini, L Gonzalez, M Tablada & CW Robledo. InfoStat 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fontanetto, H, & O Keller. 2006. Consideraciones sobre el manejo de la fertilización de la soja. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. *Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2011*, 45-79.
- Hatfield, J. 2000. Precision agriculture and environmental quality: Challenges for research and education. National soil tilt laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Ames, Iowa. Documento disponible en <http://www.arborday.org>.
- Khosla R, A Hornung, R Reich, D Inman & DG Westfall. 2006. Comparison of site specific management zone: soil-color-based and yield-based. *Agronomy Journal* 98: 407-415.
- Kravchenko, AN & DG Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1), 75-83.
- Peralta, RN; M Trueba, N Wyngaard, M Córdoba & L Salleses (2021). Agricultura de precisión: dosis variable de fósforo en soja (*Glycine max* (L.) Merr.). *Ciencia del Suelo*, 39(1).
- Pérez, G, & M Díaz-Zorita. 2018. Variabilidad sitio-específico de respuestas de maíz y de soja a la fertilización con fósforo según fechas de siembra.

- Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. IH 31, p-14.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N & N Wyngaard. 2020. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Área de investigación y desarrollo tecnológico, 8(9), 12.
- Simon, M; NR Peralta & JL Costa. 2013. Relationship between apparent electrical conductivity with soil properties and nutrients. Ciencia del suelo 31:45-55.
- Zubillaga, MM; M Carmona; A Latorre; M Falcón & J Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel lote en Vedia provincia de Buenos Aires. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná (Entre Rios), Argentina.