



UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA



FACULTAD de
CIENCIAS AGRARIAS



I P A D S

Informe Final

IMPACTO DE LA AGRICULTURA SOBRE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS DE LA REGIÓN PAMPEANA



FINANCIADO POR:

nitron **cna**

FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

>. INDICE

INDICE

→ INTRODUCCIÓN	Pág. 04
----------------------	---------

→ MATERIALES Y MÉTODOS	Pág. 06
------------------------------	---------

→ RESULTADOS Y DISCUSIÓN	Pág. 09
--------------------------------	---------

• Materia orgánica	.09
• Reacción del suelo	.11
• Niveles de fósforo extractable	.13
• Cationes intercambiables	.15

→ MICRONUTRIENTES	Pág. 23
-------------------------	---------

→ CONCLUSIONES	Pág. 34
----------------------	---------

→ BIBLIOGRAFÍA	Pág. 36
----------------------	---------



Profesional responsable

Ing. Agr. Dr. Hernán Sainz Rozas

Profesionales colaboradores:

Dr. Ing. Agr Nahuel Reussi Calvo

Lic. Bioquímica Mercedes Eyherabide

Lic en informática Hernán Angelini

Ing. Agr. María Fernanda González San Juan

Ing. Agr. Dr. Esteban Ciarlo

Técnicos de laboratorio

María D'Elia

Sergio Zarza

Natalia Pereyra



>>. INTRODUCCIÓN

La producción de granos se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años en la Argentina, pasando de aproximadamente 39 millones de toneladas en 1993 a casi 134 millones de toneladas en la campaña 2024/25. Si bien los consumos de nitrógeno (N) y fósforo (P) se incrementaron en sincronía con el aumento de la producción, la reposición de P y de otros nutrientes siguen siendo inferiores a su extracción en los granos. En el caso del P, en el año 2023 se repuso menos del 60% de lo extraído, siendo aún más baja la reposición de otros nutrientes como Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K).

Paralelamente, la intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la Región Pampeana (RP). De esta forma, dependiendo del tipo de suelo y textura, hoy en día solo se presenta el 50% del nivel original de MO (Sainz Rozas et al., 2019). El agotamiento de la MO explicaría la respuesta generalizada al agregado de N (Echeverría y Sainz Rozas, 2015), y en menor medida a azufre (S) (Reussi Calvo et al., 2009). Además, si continúa la tendencia declinante de los contenidos de MO es probable que se aceleren los procesos erosivos.

La escasa reposición de los cationes básicos podría afectar directamente el rendimiento de los cultivos e indirectamente a través de la alteración de otras propiedades físico-químicas relacionadas con el estado de salud de los suelos (materia orgánica, actividad microbiana, densidad aparente, estabilidad de agregados, pH). Durante un relevamiento realizado en 2018 se informó que los valores más bajos de pH (desde 5,5 a 5,8) se determinaron en la zona norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (Sainz Rozas y Echeverría, 2019). Si bien estos valores de pH determinados no son considerados limitantes para la mayoría de los cultivos (Vázquez y Pagani, 2015), es de esperar que de continuar esta tendencia sea necesario la aplicación de correctores de acidez en áreas críticas y en cultivos sensibles como la soja. Por otra parte, el

K intercambiable (Ki) fue el nutriente que mostró mayor caída respecto de los suelos prístinos y los menores niveles de Ki se ubicaron al noreste de la región pampeana. El Ca y el Mg intercambiables también mostraron una fuerte reducción respecto a los suelos prístinos y los valores más bajos se observaron al nor-noroeste de la RP (Sainz Rozas et al., 2019). Por lo tanto, es necesario contar con información actualizada de los contenidos de bases intercambiables y de la acidez del suelo, y de su distribución geográfica.

Las deficiencias de micronutrientes (Mn, Fe, Cu, B y Zn) son menos frecuentes que para el caso de N, P y S en la región pampeana. Sin embargo, el incremento del uso de fertilizantes nitrogenados puede incrementar la exportación de estos, tanto por un aumento de su concentración en los granos como por el aumento de los rendimientos (Goldman et al., 2002). Los datos de un relevamiento realizado en 2018 en suelos de la región pampeana indican que el micronutriente que mostró la mayor caída por la agricultura fue el Zn (70% menos respecto de la condición prístina) seguido del boro (B) (30 al 40%). Las áreas de mayores deficiencias de estos micronutrientes se ubicaron al nor-noroeste y suroeste de la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2019). Desde este muestreo a la fecha los rendimientos de los cultivos se han incrementado y con ello la extracción de micronutrientes, lo que hace necesario contar con información actualizada de su disponibilidad en suelos de la región pampeana Argentina.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar los niveles actuales de MO, pH, P-Bray, Ca, Mg, K intercambiable y micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn y B) en los mismos lotes muestreados en 2011 y 2018) determinar el cambio de dichas variables entre 2011, 2018 y 2024; y 3) elaborar mapas con los resultados actuales y compararlos con aquellos del muestreo realizado en 2011 y 2018.

>>. MATERIALES Y MÉTODOS

Entre julio y septiembre de 2024 se tomaron un total de 570 muestras de suelo de la región pampeana Argentina (latitud: 33°O 23° S a 38° O 47° S, longitud: 57°O 36°O a 63°O 23°O), que abarca las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, La Pampa, Entre Ríos y Córdoba. La Figura 1 describe los sitios de muestreo y los tipos de suelo predominantes. Todos los sitios muestreados se corresponden con los muestreados en 2011 y 2018. En cada sitio, se tomó una muestra de suelo compuesta (30 sub-muestras por sitio) de la capa de suelo de 0 a 20 cm usando un muestreador de acero inoxidable. Las muestras se secaron al aire, se mezclaron, se tamizaron para pasar una malla de 2 mm y se almacenaron en recipientes de plástico.

Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio del Grupo de Relaciones Suelo-Planta del INTA-FCA Balcarce a partir de muestras secadas a 30°C y tamizadas por 2 mm. Se determinó pH actual (relación suelo:agua de 1:1), P-Bray I (Bray and Kurtz, 1945), contenido de materia orgánica (MO) (combustión húmeda) y cationes intercambiables (Cai, Mgi y Ki) por extracción con 20 ml de acetato de amonio 1N a pH 7 con agitación de 5 minutos (se pesaron 4 g de suelo y se lo agitó a 220 golpes por minuto). La suspensión se filtró y el extracto se usó para determinar los cationes básicos mediante espectroscopia de emisión de llama (para el caso del K) y por absorción atómica para los demás cationes (Shimadzu AA-6200). La disponibilidad de Ki, Cai y Mgi se expresó en mg kg⁻¹ de suelo. Para la determinación de micronutrientes se siguió la técnica propuesta por Lindsay y Norvell (1978). Brevemente, se colocaron 10 g de suelo en un matraz cónico de 125-ml junto con 20 ml del extractante DTPA-TEA solución (pH = 7,3) y tras agitar durante 2 h la suspensión se filtró a través de un Whatman no. 42 papel de filtro (Melanin Corp., Mobile, AL). Los filtrados fueron analizados utilizando espectrofotometría de absorción atómica (Modelo AA-600, Shimadzu Co., Kyoto, Japón). Para la determinación de B en suelo se siguió la técnica propuesta por Keren (1996). Brevemente, se colocaron 5 g de muestra de suelo y se le agregó 25 ml de la solución extractiva (Ac. Amonio 1M, pH 4,8), se agitó 30 minutos con los tubos ubicados en posición horizontal y luego se

procedió al filtrado. Del filtrado se tomó una alícuota de 7,5 ml y se colocó en un tubo de 15 ml, para luego agregar 1 ml la solución de azometina, 1 ml de solución de EDTA y 1 ml de la solución buffer, dejando que se desarrolle color por 2 horas. Se realizó una curva de calibración y se leyó en un espectrofotómetro UV- visible a una longitud de onda de 420 nm.

Se realizó un análisis de conglomerados o *clústeres* (AC) para agrupar suelos con características edáficas similares. Los clústeres se presentan en la Figura 2. Para cada clúster, variable y fecha de muestreo (2011, 2018 y 2024), se compararon los valores medios previo análisis de normalidad de la distribución de cada variable por medio de los tests de Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov. La comparación de medias se realizó con el método paramétrico de la distribución T-student luego de corroborar la normalidad y la homogeneidad de varianza con el F-test, usando la corrección de Welch cuando las varianzas no fueron iguales. Cuando los datos no tuvieron una distribución normal se utilizó el test no paramétrico de Wilcoxon (Bilisoly et al., 1997). El análisis estadístico y comparación de medias se realizó en R versión 4.2.3 (R Core Team, 2023).

Los mapas se realizaron mediante el programa ESRI ArcMap con el valor de cada variable edáfica asociado a su posición geográfica. El método de interpolación utilizado fue el que mejor se ajustó al comportamiento de la semivarianza. Para que los resultados sean comparables, los rangos de disponibilidad utilizados en los mapas fueron los mismos que en el muestreo realizado en 2011 y 2018.

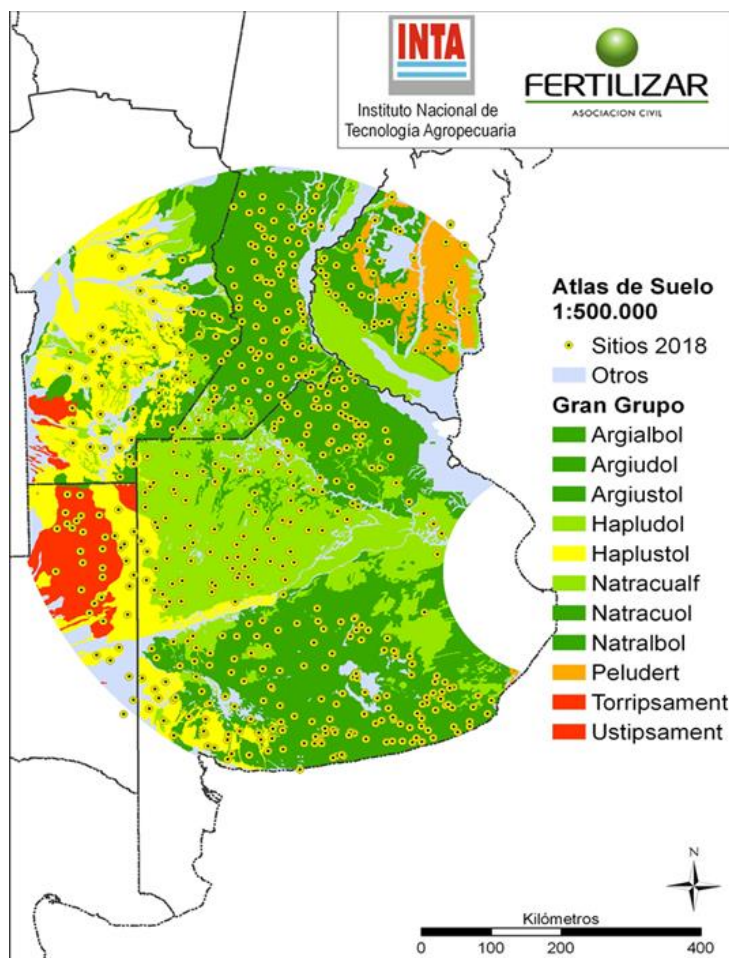


Figura 1. Mapa indicando los sitios de muestreos y los principales grandes grupos de suelos.

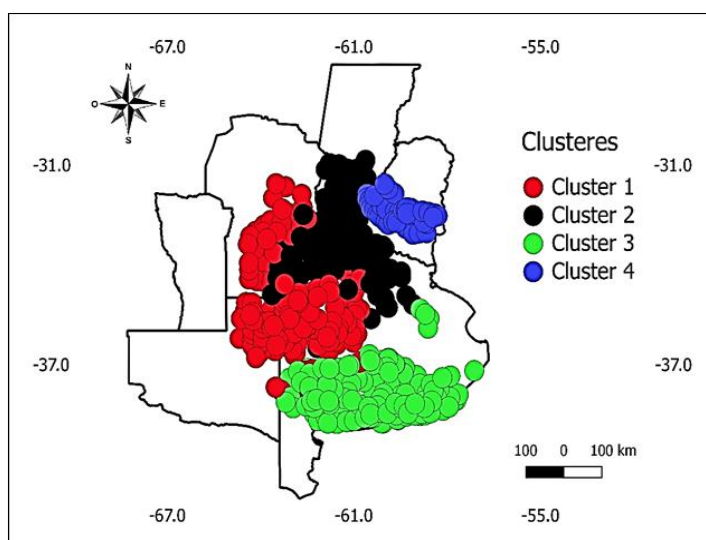


Figura 2. Clústeres o subregiones con suelos de características similares surgidos del análisis de conglomerados.

>>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

▶▶ Materia orgánica

No se observaron diferencias significativas en los niveles de MO entre el 2011 y las demás fechas de muestreo (**Figura 3**). Respecto a la condición prístina, la reducción de la MO causada por la actividad agrícola varió del 15 al 34%, correspondiendo estos valores los clústeres 4 y 2 (Entre Ríos y zona norte de la RP, respectivamente). El hecho de que la MO no se modificó entre 2011 y 2024 sugiere que se ha alcanzado un nuevo equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de C.

El patrón de MO fue el mismo en suelos prístinos y agrícolas, esto es: la MO disminuyó desde el sureste hacia el noroeste de la región (**Figura 4**). A escala regional, el nivel de MO en suelos prístinos está determinado por el clima, que regula la magnitud de las entradas de carbono (biomasa) y las salidas (respiración microbiana) en el sistema del suelo (Álvarez y Steinbach, 2006). El menor contenido de MO en el área occidental que en el este, está determinado por una menor precipitación anual, mientras que la disminución de norte a sur es una consecuencia de la menor temperatura. Otro factor que puede explicar el gradiente de MO de este a oeste es la textura, ya que las arcillas del suelo (más abundantes en el área este) protegen a la MO de la descomposición microbiana, favoreciendo la acumulación de MOS (Six et al., 2002).

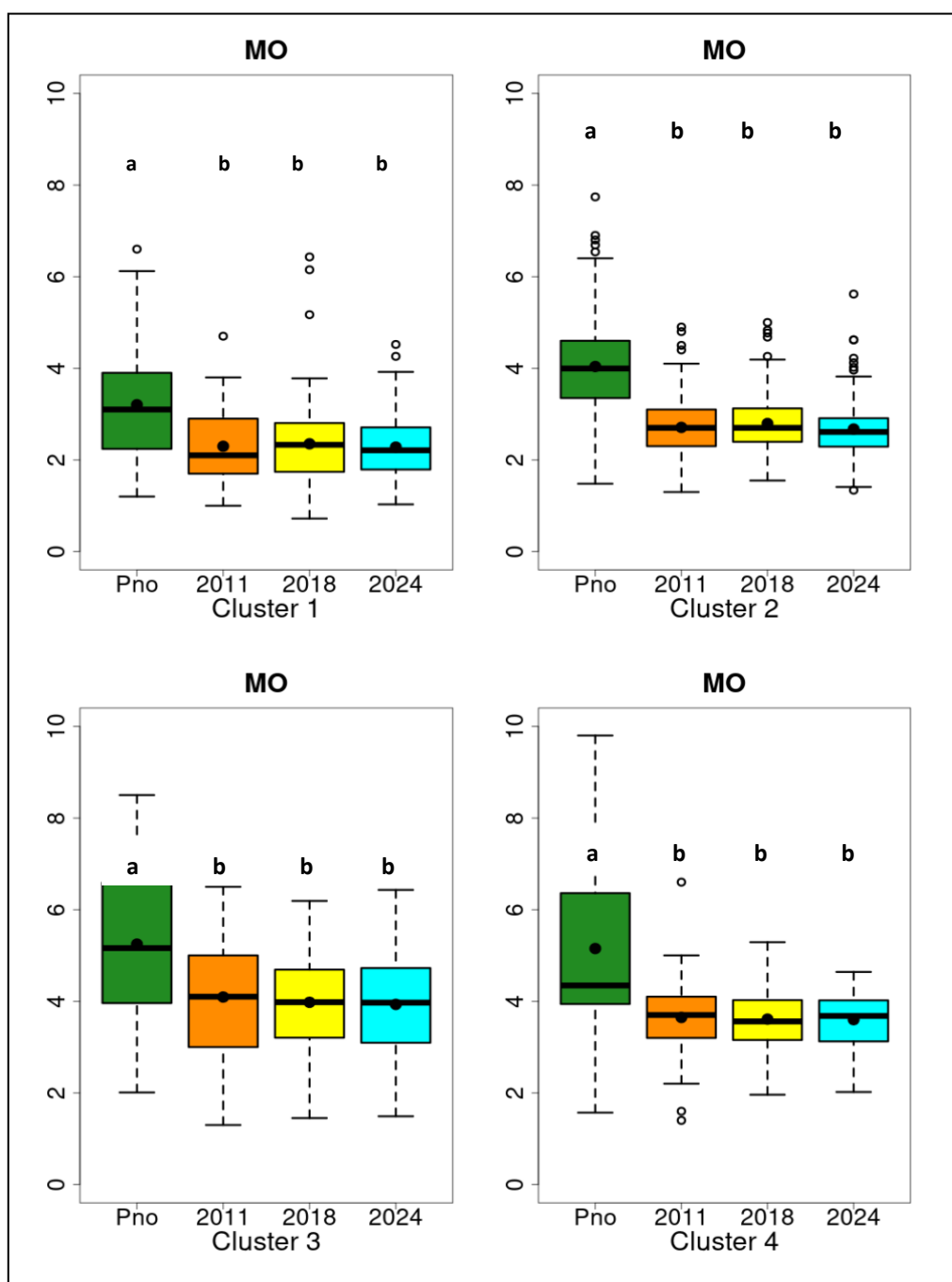


Figura 3. Evolución de los niveles de MO para los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

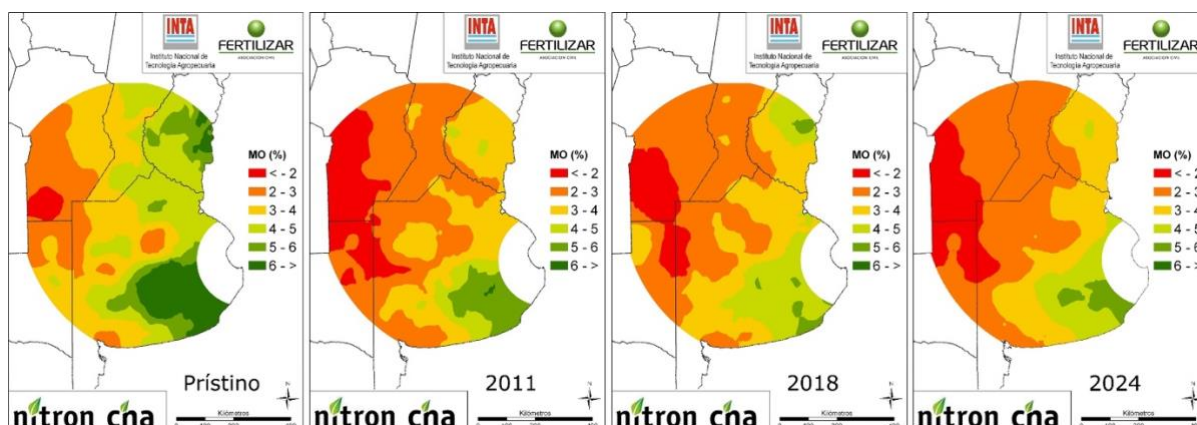


Figura 4. Niveles de MO (0-20 cm) en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

►► Reacción del suelo

El pH del suelo tendió a disminuir con el tiempo, ya que la mayoría de los sitios presentaron diferencias significativas entre los suelos prístinos y los suelos agrícolas muestreados en 2011 o 2018. Sin embargo, entre 2018 y 2024 se determinó un ligero incremento del pH en los clústeres 2 y 3 (**Figura 5**). Sin embargo, similar a lo determinado en 2018, los suelos con pH mas ácido (< 6,1) se ubican en una amplia región que va desde el sudeste de Bs As al centro-sur de Santa Fe (**Figura 6**). La mayor acidificación observada en esta última zona puede ser explicada por una mayor exportación de cationes básicos debidos a los mayores rendimientos de cultivos y a la frecuencia del monocultivo de soja y a la presencia de horizontes texturales B, que determinan que la extracción de bases se limita principalmente al horizonte superficial (Correndo et al., 2011). Estos valores de pH pueden llegar a ser limitantes para las leguminosas y para la actividad microbiana, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes. En este sentido, en suelos con contenidos similares de N en el pool orgánico lábil, Divito et al. (2011) determinaron que la cantidad de N liberada durante una incubación anaeróbica del suelo varió de 63 a 78 mg kg⁻¹ para valores de pH de 5.3 y 5.8, respectivamente.

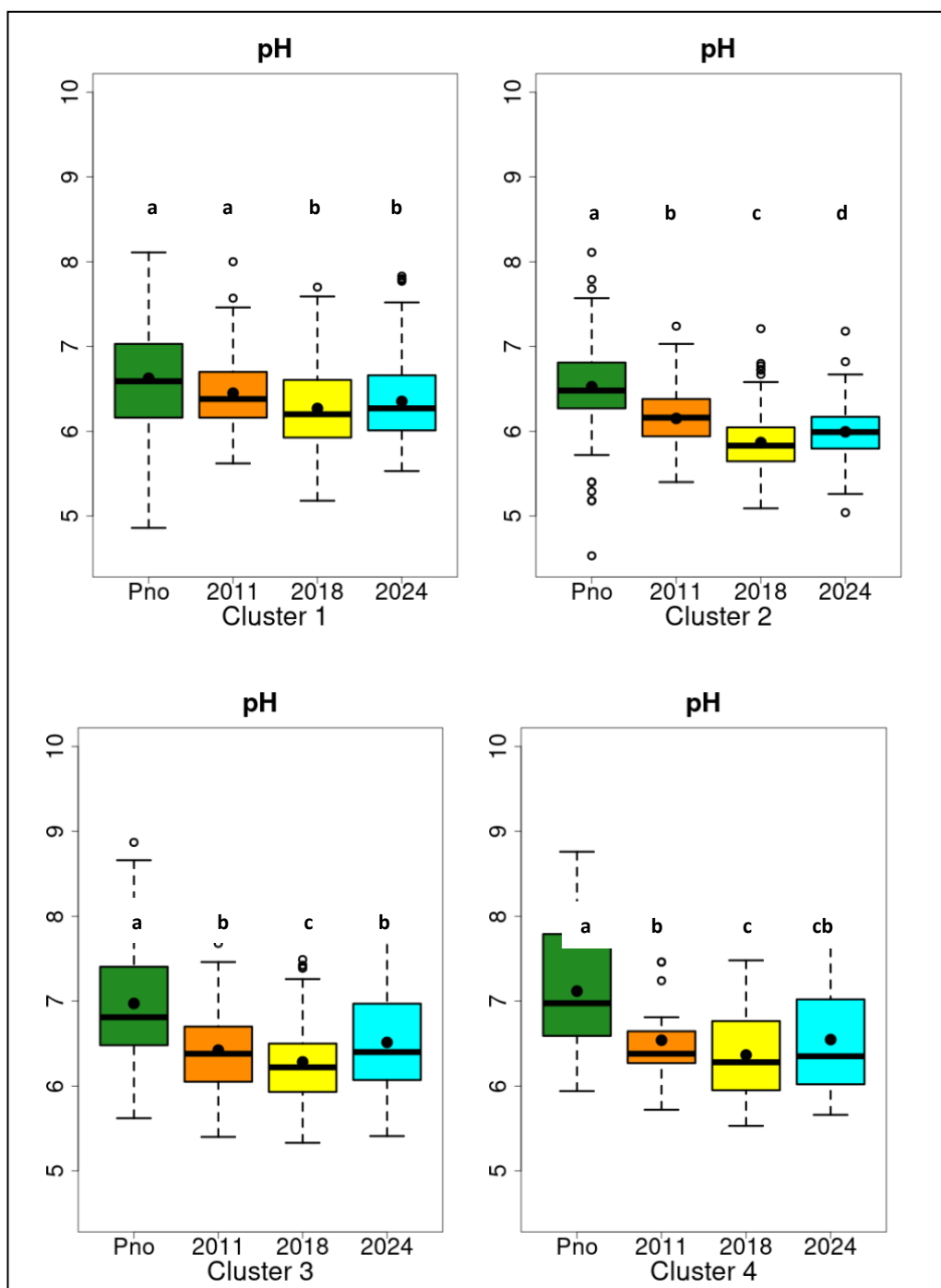


Figura 5. Evolución del pH edáfico para los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

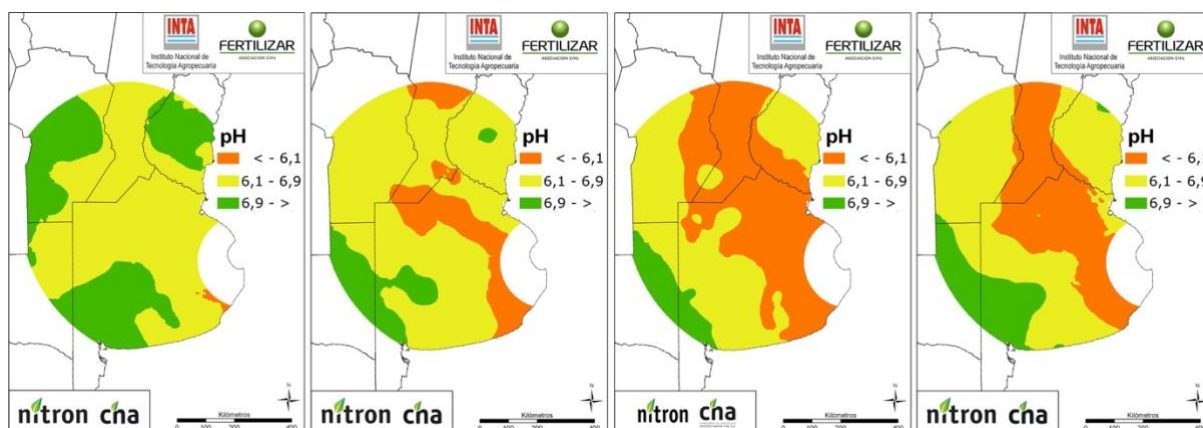


Figura 6. Niveles de pH (relación suelo:agua 1:1) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

►► Niveles de fósforo extractable

La reducción del nivel de P-Bray en suelos de la RP (promedio de clústeres) fue de un 62%, si comparamos los valores promedio de los clústeres en 2024 respecto a los valores de los suelos prístinos, siendo mayor aún en los clústeres 1 y 2 (**Figura 7**). Los niveles medios de P extractable (P-Bray) en los clústeres 2 y 3 aumentaron en el 2024 respecto al 2018 (**Figura 7**). Esto puede deberse a que las sequías ocurridas en campañas previas redujeron los rendimientos y la exportación de P en los granos, dado que el consumo de P del país en dicho período no se incrementó significativamente. Como puede visualizarse en la **Figura 8**, una proporción importante del área cultivada de la RP muestra niveles de P-Bray entre 10 a 15 mg kg⁻¹, pero respecto a 2018, se incrementó el área con niveles de P-Bray por debajo de 10 mg kg⁻¹ (este de Entre ríos, noreste y centro-sur de Bs As) (**Figura 8**). Esto sugiere que los balances de P continuaron siendo negativos durante el período 2018/2024. Si se asume que los umbrales críticos de P-Bray para la mayoría de los cultivos oscilan de 12 a 18 mg kg⁻¹ (García et al., 2015), estos resultados indican que el nivel actual de P-Bray en los suelos de esta vasta región podría ser limitante para la producción de los cultivos.

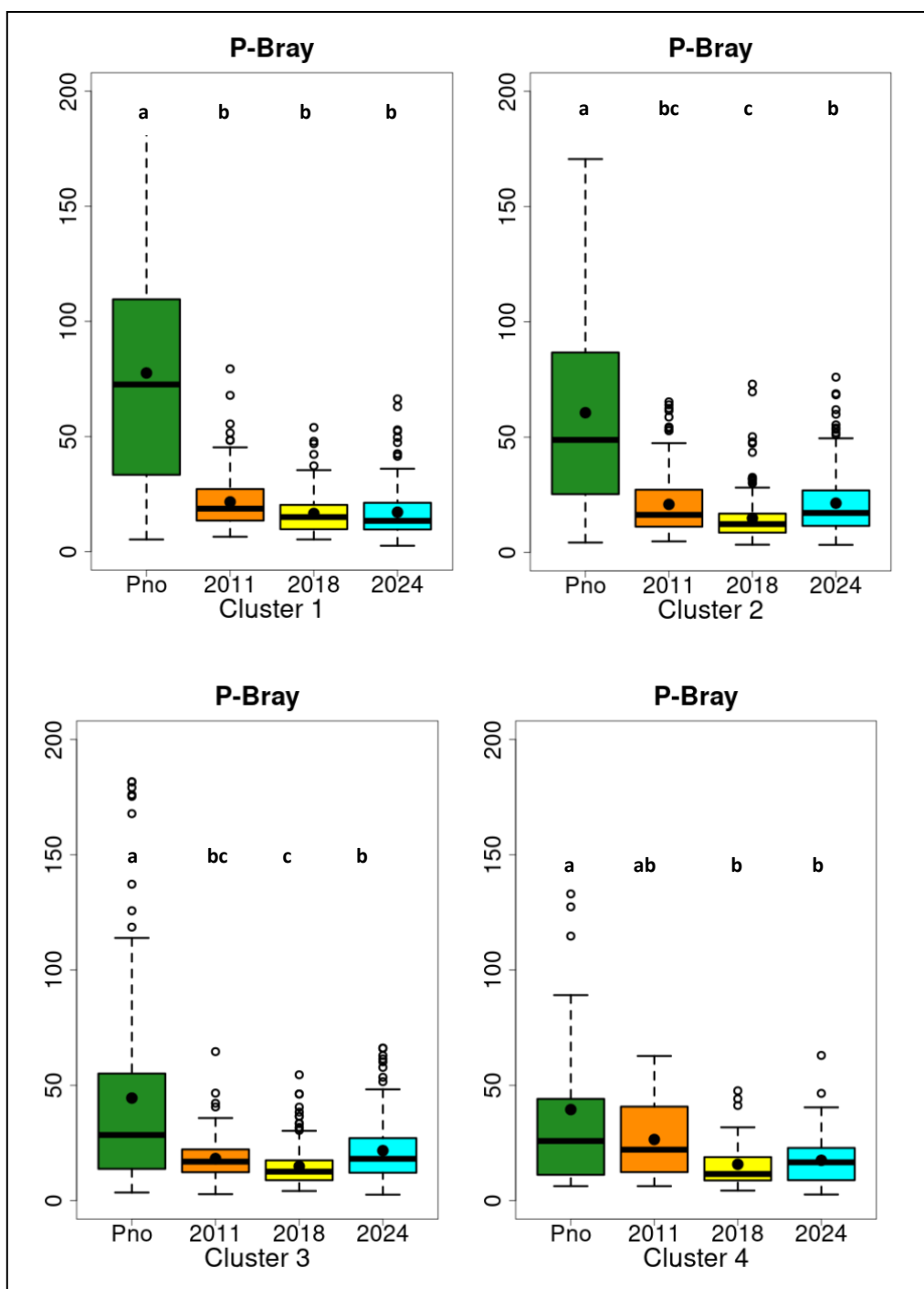


Figura 7. Evolución de los niveles de P extractable en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

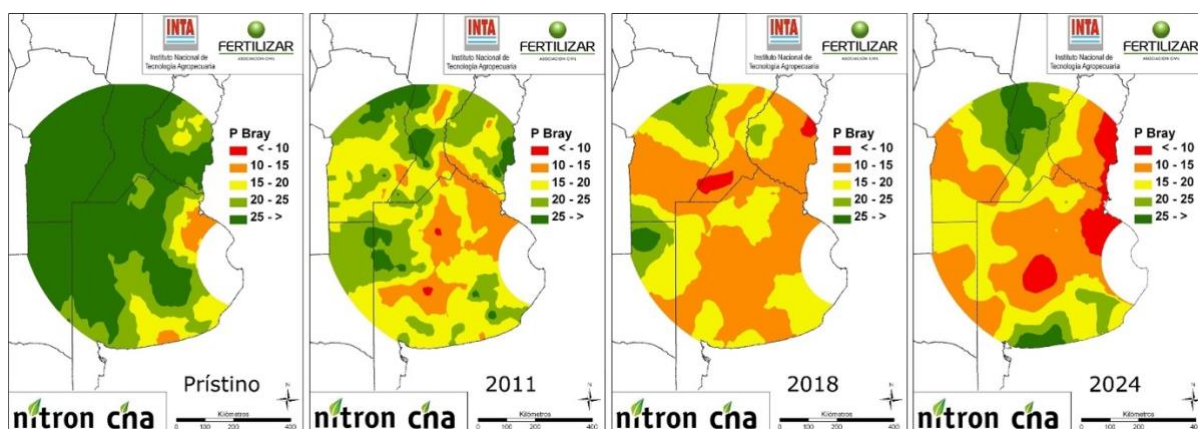


Figura 8. Niveles de P extractable (P-Bray) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

►► Cationes intercambiables

Los valores de Calcio intercambiable, Ca_i , determinados en el último muestreo estuvieron en el rango medio a alto (de 1113 a 3383 $mg\ kg^{-1}$) en la mayoría de los clústeres, y por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). En todos los clústeres se determinó una reducción del Ca_i en 2024 respecto al 2018 (**Figura 9**), y los valores medios del 2024 representan del 54 al 62% de los valores originales. La reducción del Ca_i respecto al 2018 varió de 417 a 855 $mg\ kg^{-1}$, o sea una reducción de 70 a 143 $mg\ kg^{-1}\ año^{-1}$. Esto hizo que aumentara el área con suelos con menos de 1000 $mg\ kg^{-1}$ de Ca_i respecto al 2018, la cual se ubicó al este y noroeste de Bs As, este de La Pampa y sur de Córdoba (**Figura 10**).

Larrea et al. (2025) informaron un umbral crítico de 800 $mg\ kg^{-1}$ de Ca_i para el cultivo de soja, por debajo del cual la reducción del rendimiento es superior al 10%. En base a esta información y con la reducción anual de Ca_i determinada entre 2018 y 2024, las deficiencias de Ca podrían comenzar a ser importantes en el corto plazo (3 a 4 años), particularmente en las zonas que actualmente tienen menos de 1000 $mg\ kg^{-1}$.

A diferencia de lo que se observó con Ca_i , una reducción significativa del Magnesio intercambiable, Mg_i , entre 2024 y 2018 fue observada solo en dos de los cuatro clústeres (**Figura 11**). La magnitud de la disminución del Mg_i respecto de los suelos prístinos osciló entre 44% y 53%, correspondiendo el mayor valor al clúster 2, seguidos por los clústeres 1 y 3 (**Figura 11**). Los valores de Mg_i determinados en el último muestreo estuvieron dentro del rango considerado alto, salvo en el norte de Bs As y sur oeste de Córdoba donde los valores están por debajo de 200 mg kg^{-1} (**Figura 12**) y se acercan a los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015).

Las mayores caídas determinadas de Mg_i en el norte de la RP pueden estar asociadas a que estas áreas presentan los mayores rendimientos de soja y maíz. A manera de ejemplo los rendimientos de soja y maíz oscilan de $4,1$ a $4,9 \text{ t ha}^{-1}$ y de $11,6$ a 13 t ha^{-1} , respectivamente (Aramburu Merlos et al., 2015). Estos rendimientos se asocian a niveles de extracción aproximados de Mg en los granos de $12,3$ a $14,7 \text{ kg/ha/año}$ para soja y de $17,4$ a $19,5 \text{ kg/ha/año}$ para maíz. Además, el Mg es adsorbido más débilmente por los coloides del suelo que el Ca y, por consiguiente, es más susceptible de ser desplazado por el H^+ y luego lixiviado cuando el suelo se acidifica (Brady y Weil, 2008).

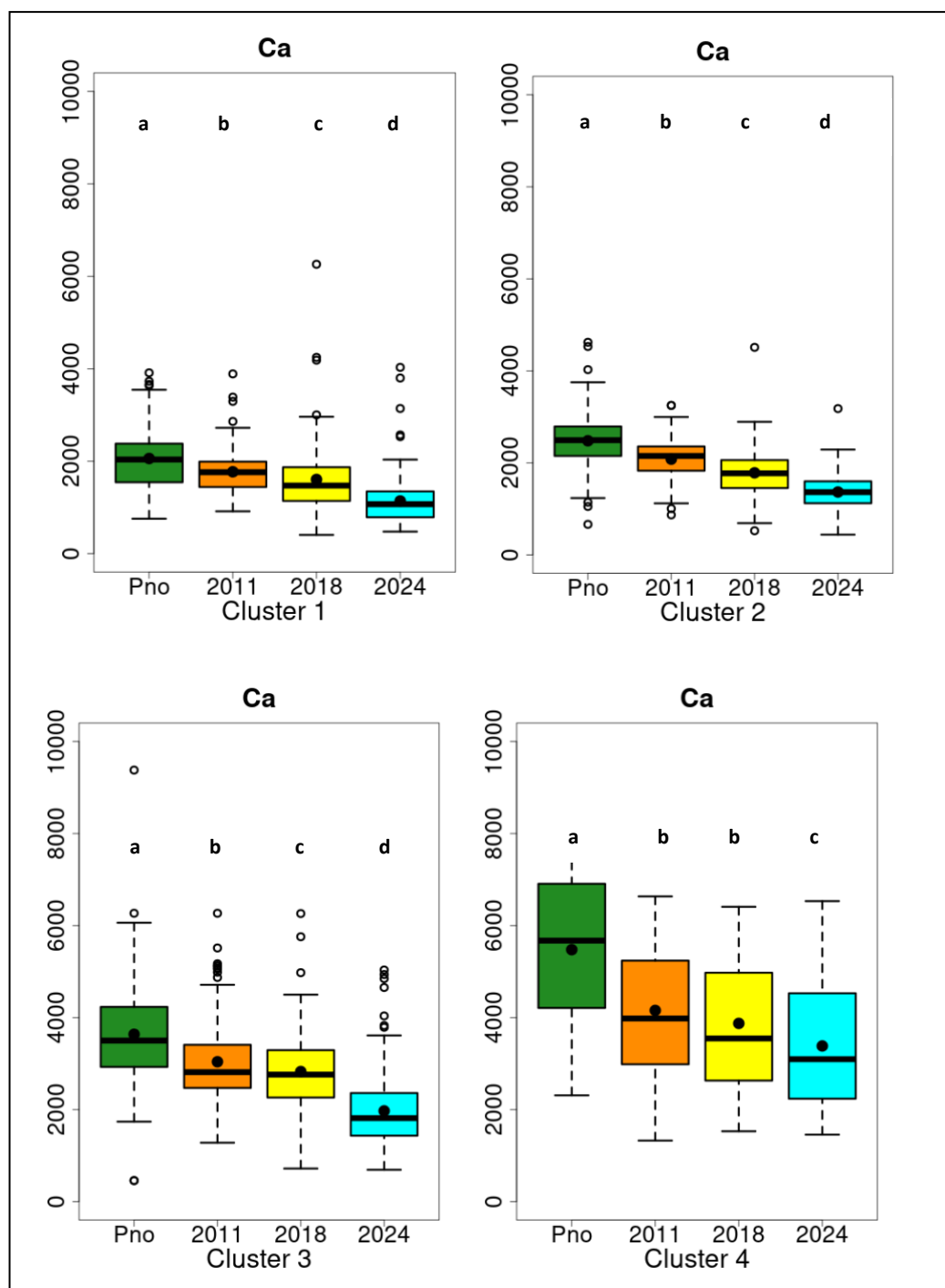


Figura 9. Evolución de los niveles Ca intercambiable (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

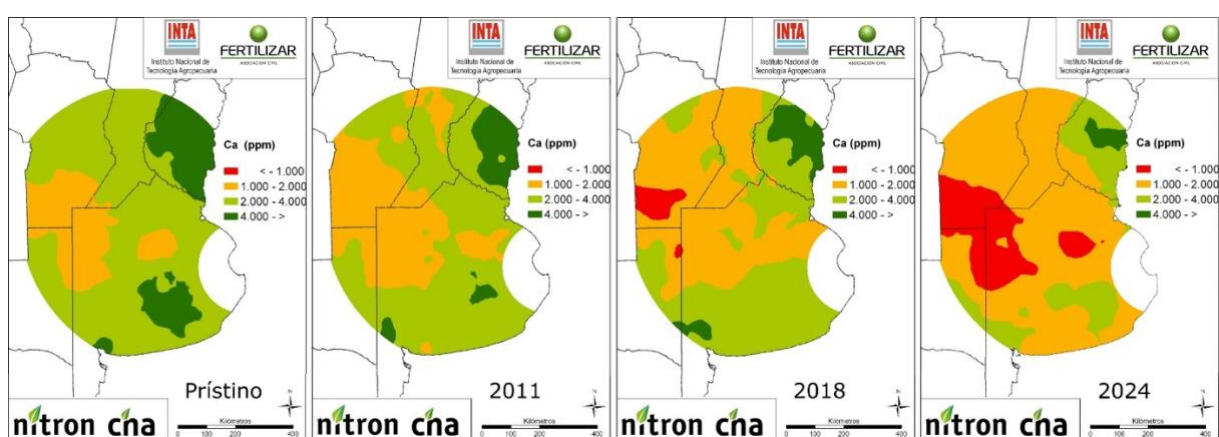


Figura 10. Niveles de Ca intercambiable en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

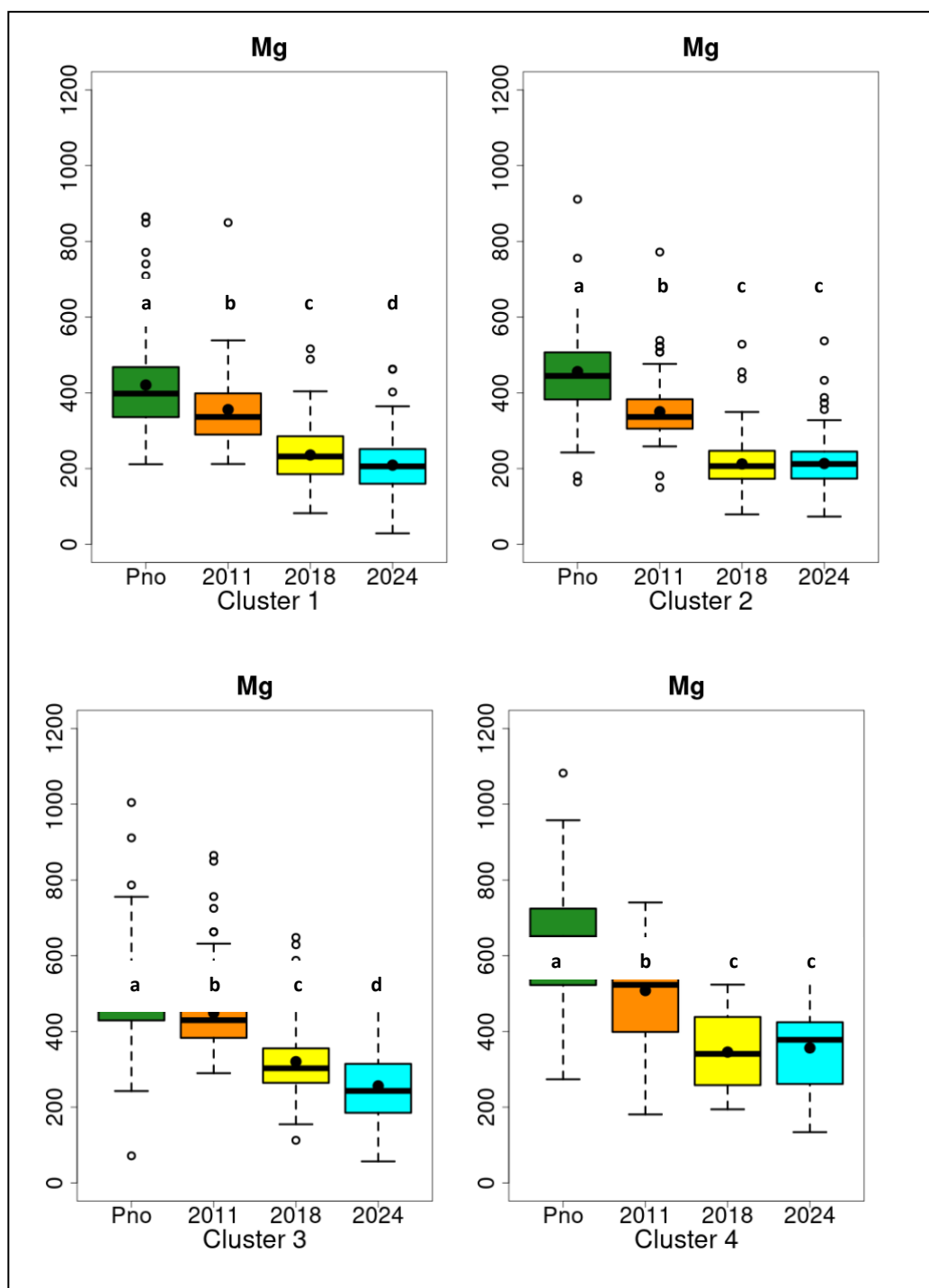


Figura 11. Evolución de los niveles Mg intercambiable (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

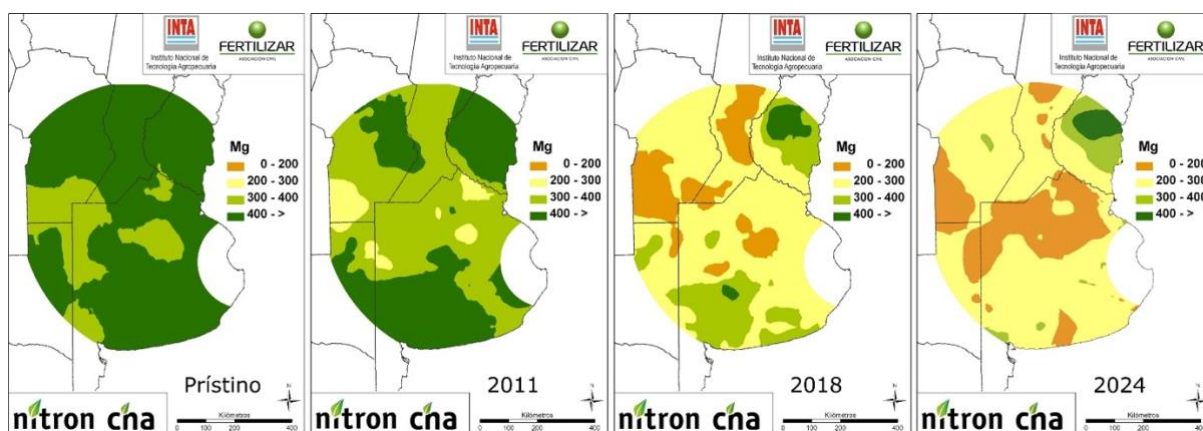


Figura 12. Niveles de Mg intercambiable en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

Los valores de medios de Potasio intercambiable, K_i , estuvieron dentro del rango alto a muy alto en la mayoría de los clústeres (445 a 694 mg kg^{-1}), con excepción del clúster 4, cual mostró un valor medio de 281 mg kg^{-1} ($\pm 110 \text{ mg kg}^{-1}$), con el agravante que el 50% de los datos de este clúster tuvo un valor inferior a 266 mg kg^{-1} (**Figura 13**). Este valor es inferior al umbral crítico informados por algunos autores (Barbazán et al., 2011; Barbagelata y Mallarino, 2012; Orcellet et al., 2024; Avila Manotoa et al., 2025). A diferencia de Ca_i y del Mg_i , no hubo reducción de los valores medios de K_i entre 2024 y 2018 en ninguno de los clústeres y tampoco creció el área con valores de K_i medios (de 200 a 400 mg kg^{-1}). Sin embargo, en el 2024 creció el área con valores de K_i menores a 200 mg kg^{-1} a este de Entre Ríos, en zonas cercanas al río Uruguay, cuyos suelos se han formado a partir de un material con bajo nivel de K (**Figuras 13 y 14**). La relativa constancia de los niveles de K_i en la mayor parte del área relevada puede deberse a un equilibrio entre el K_i y el K no intercambiable de fácil accesibilidad para los cultivos, fracción del K del suelo que puede duplicar en tamaño al K_i (Avila Manotoa, et al., 2025).

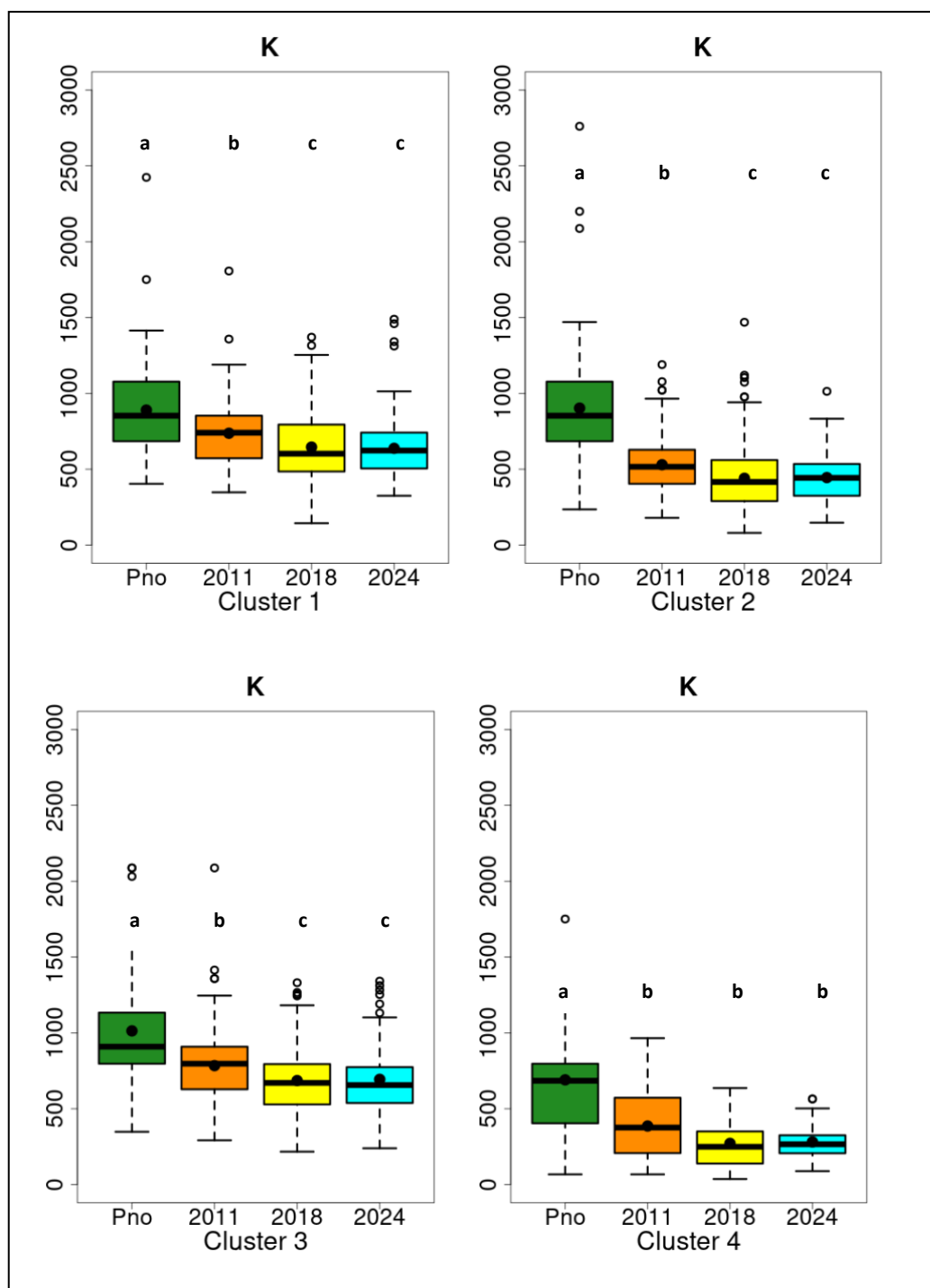


Figura 13. Evolución de los niveles K intercambiable (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

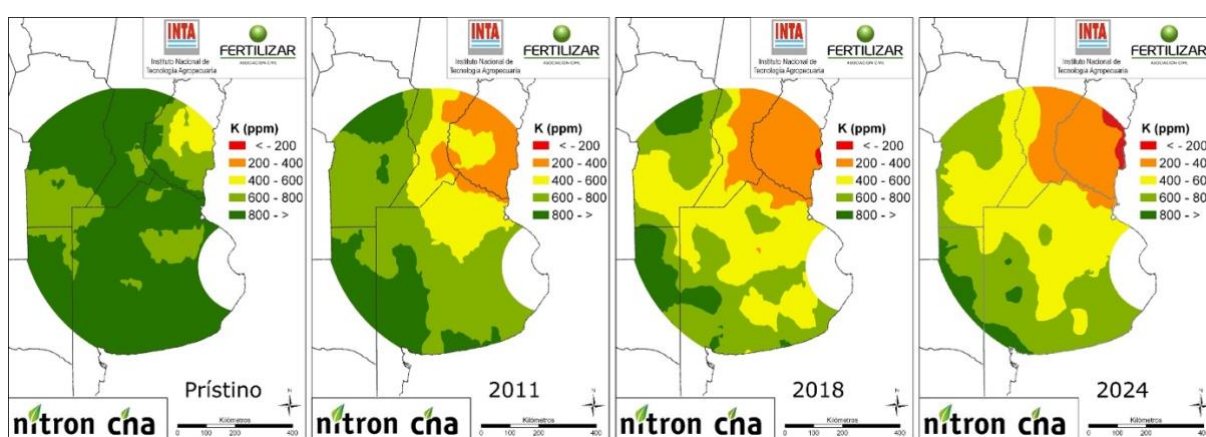


Figura 14. Niveles de K intercambiable en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina

>>. MICRONUTRIENTES

La actividad agrícola no disminuyó los contenidos Fe extractable con DTPA y en algunos clústeres se observó un mayor valor en 2024 que en 2018 (**Figura 15**), a pesar de que, junto con el Mn, es un micronutriente que presenta elevada extracción en los granos (Torri et al., 2015) y a que la fertilización es muy baja o inexistente. Esto puede deberse a que es uno de los elementos más abundantes en los suelos de la región pampeana (contenidos totales de 20900 mg kg⁻¹; Lavado y Porcelli, 2000) y a que la acidificación de estos (**Figura 6**) promovió el pasaje de formas no disponibles a formas disponibles, ya que se determinó una elevada correlación entre pH y Fe extractable con DTPA ($r = -0,57$). En este sentido, Lindsay (1991) informó que el aumento del Fe soluble por unidad disminución de pH es casi del 60% superior que la del Mn soluble.

Los valores de Fe extractable con DTPA en el muestreo realizado en 2024 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (72 a 96 mg kg⁻¹) en todos los clústeres o subregiones (**Figuras 15 y 16**) y superan ampliamente a los umbrales críticos (2,5 a 5 mg kg⁻¹) informados por Sims y Johnson (1991).

Los valores medios de Mn-DTPA del muestreo realizado en 2024 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (28 a 66 mg kg⁻¹) en todos los clústeres o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos (2,5 a 8 mg kg⁻¹) informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims y Johnson, 1991; **Figura 17**). No se determinaron cambios del contenido de Mn entre el 2018 y 2024 (**Figura 17**).

A pesar de lo mencionado y a diferencia del Fe-DTPA, se observó un crecimiento del área con valores de 10-20 mg kg⁻¹ y, en menor medida del área con menos de 10 mg kg⁻¹ al oeste de Buenos Aires y este de La Pampa y sur de Córdoba (**Figura 18**). A pesar de que estos niveles de Mn-DTPA aún superan a los umbrales críticos mencionados, los resultados de este trabajo sugieren que hay que comenzar a monitorear los niveles de este nutriente en suelos de estas zonas.

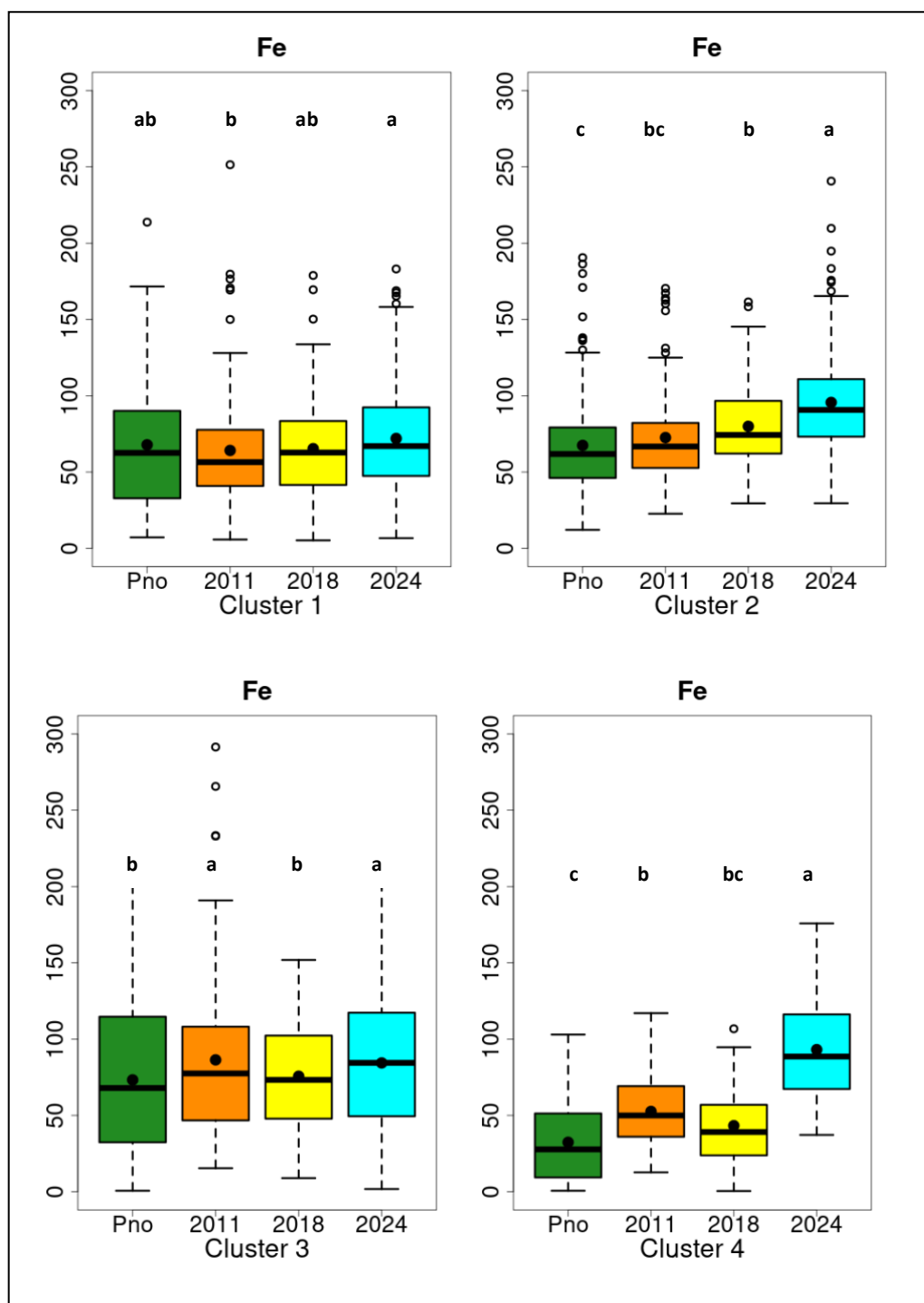


Figura 15.. Evolución de los niveles de Fe-DTPA (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

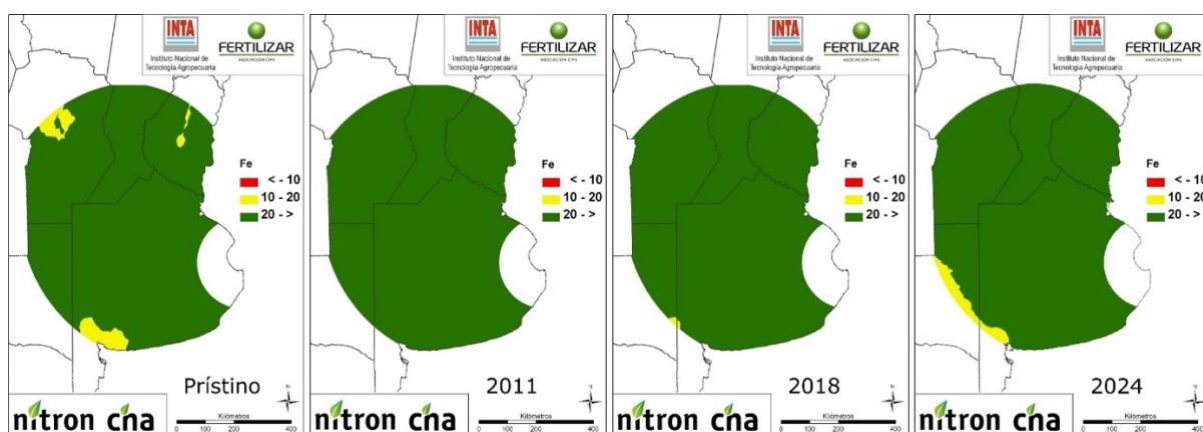


Figura 16. Niveles de Fe-DTPA (ppm) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

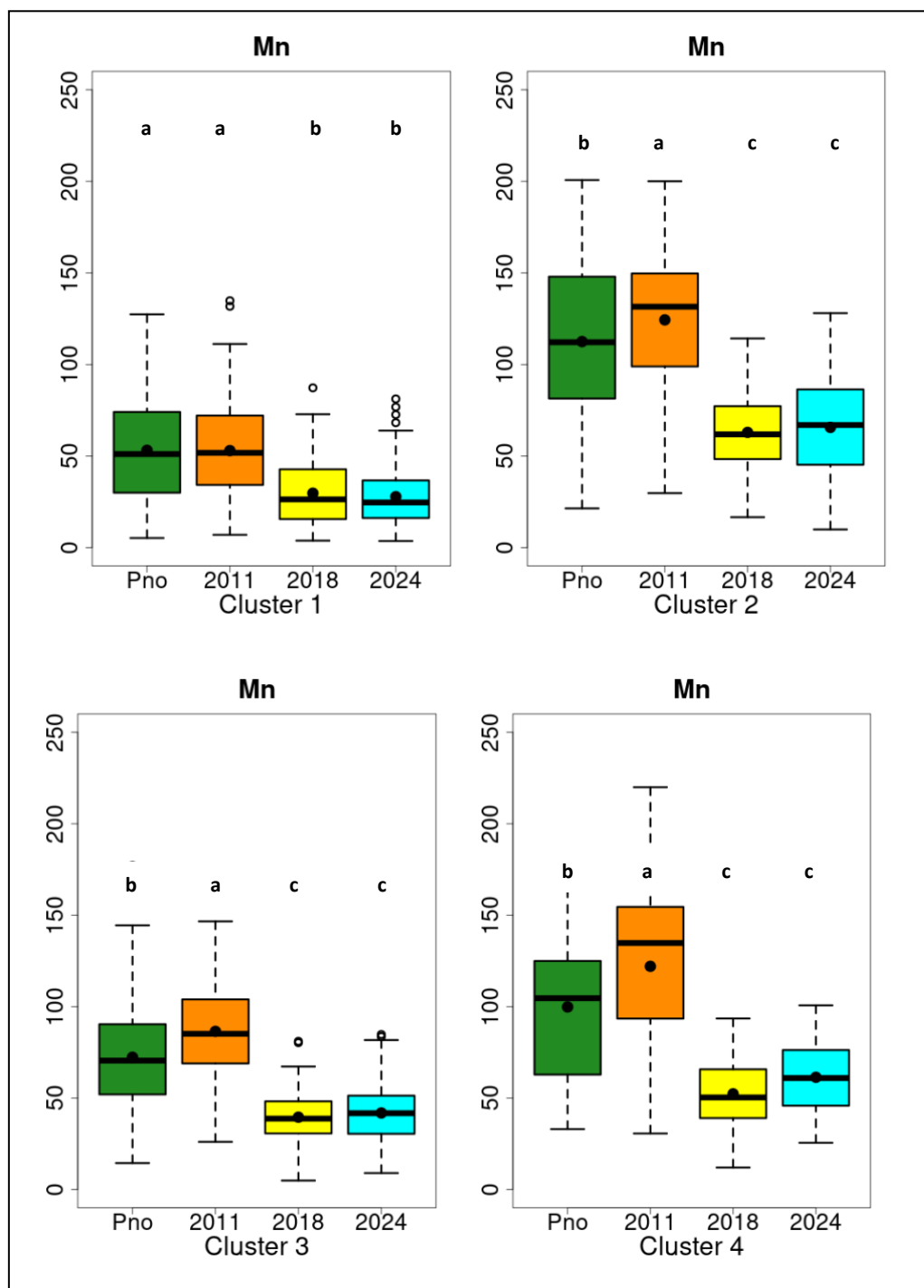


Figura 17. Evolución de los niveles de Mn-DTPA (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

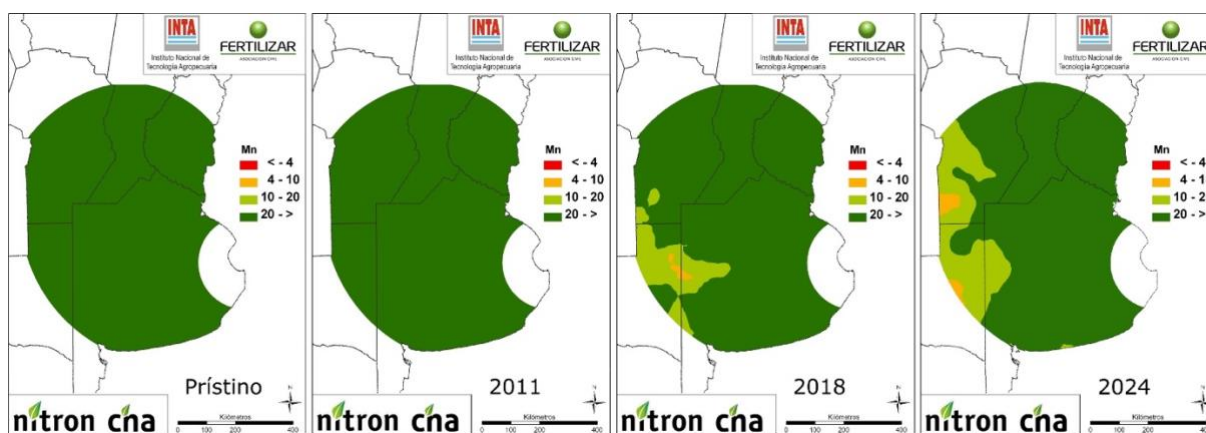


Figura 18. Niveles de Mn-DTPA (ppm) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

Los valores de Cu extractable con DTPA del muestreo realizado en 2024 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad ($1,0$ a $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$) en todos los clústeres o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos ($0,4$ a $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$) informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003). Si bien en algunos clústeres los valores del 2024 son menores a los del 2018, los determinados en 2024 en general no difieren de los determinados en 2011 (**Figura 19**). Esto sugiere que la actividad agrícola no produjo una reducción significativa del Cu-DTPA. Esto puede deberse a que es uno de los micronutrientes catiónicos que presenta menor extracción en grano y a que la disponibilidad de Cu en suelos de la región pampeana es mayor en horizontes sub-superficiales que superficiales (Ratto, 2006), los cuales podrían abastecer en gran medida los requerimientos de los cultivos. En ningún área de la región pampeana se determinaron valores por debajo de $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (**Figura 20**) y, por lo tanto, la respuesta a este micronutriente es poco probable en la mayor parte del área relevada.

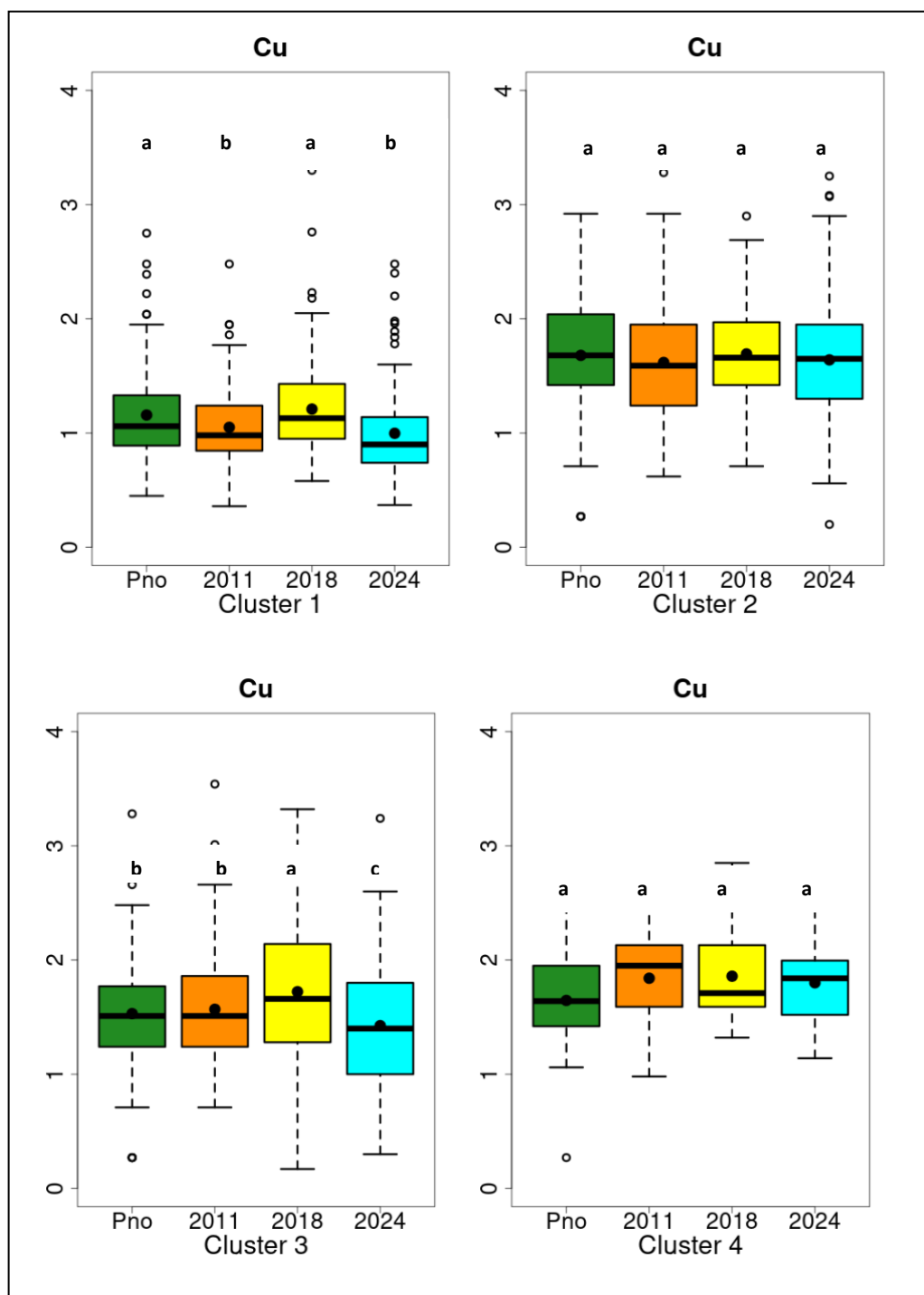


Figura 19. Evolución de los niveles de Cu-DTPA (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

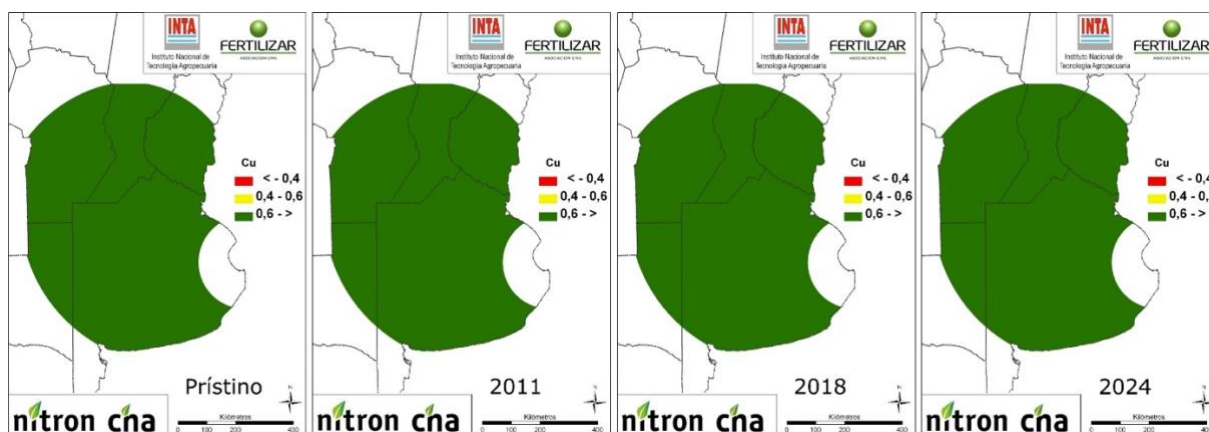


Figura 20. Niveles de Cu-DTPA (ppm) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

En uno de los cuatro clústeres, el valor medio de Zn-DTPA en el muestreo de 2024 estuvo muy por debajo del umbral crítico informado para soja y maíz por Bustos (2021) y Barbieri et al. (2017) (1,25 y 1,04 mg kg⁻¹, respectivamente). Sin embargo, en todos los clústeres los valores medios de 2024 similares a los del 2018 (**Figura 21**). Respecto a la situación prístina, los niveles de Zn-DTPA del 2024 son del 76 al 79% más bajos, lo que indica claramente que el balance de Zn en las últimas dos o tres décadas ha sido negativo (> extracción por granos y pérdidas por lavado que el ingreso al sistema).

Cuando se compara el mapa de disponibilidad de Zn del 2018 y 2024, se puede observar un crecimiento del área con niveles de Zn-DTPA entre 0,8 y 1,2 ppm a expensas de una reducción del área con niveles entre 0,4 y 0,8 mg kg⁻¹, particularmente al norte de la RP (**Figura 22**). Esto está en línea con lo observado en el consumo de Zn a nivel país, que paso de 338 t en 2020 a 1472 t en 2023. No obstante, parte del oeste y sudoeste de la RP permanece con valores de Zn-DTPA muy bajos (**Figura 22**)

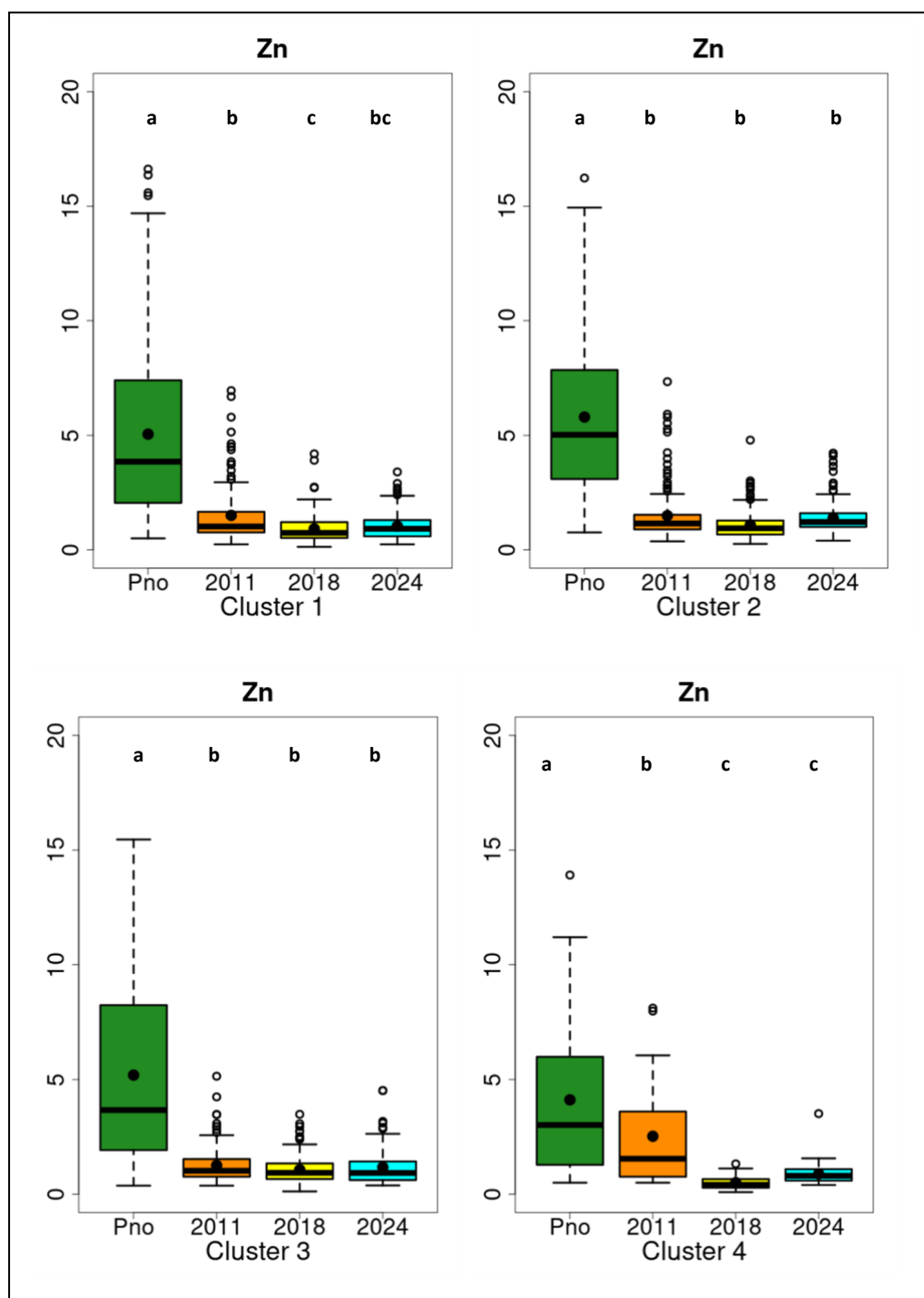


Figura 21. Evolución de los niveles de Zn-DTPA (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

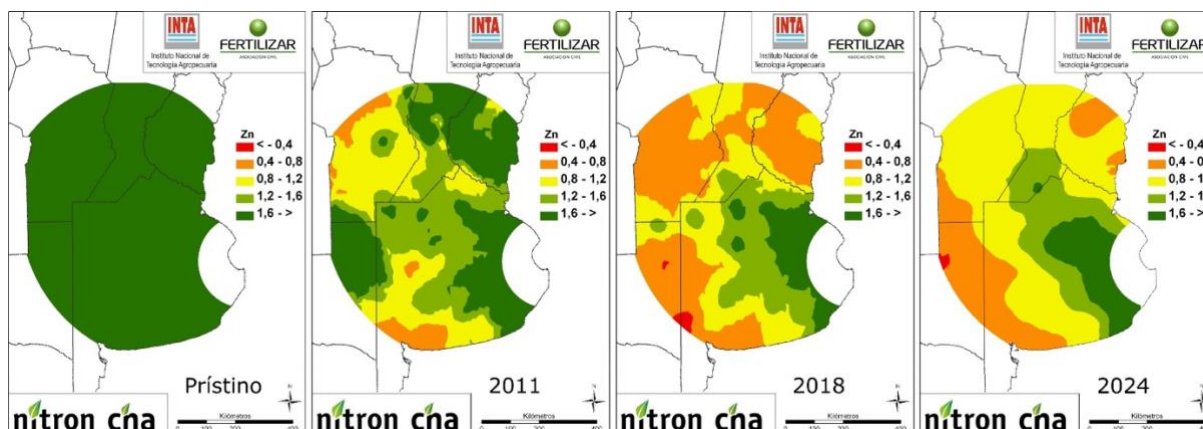


Figura 22. Niveles de Zn-DTPA (ppm) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

En tres de los cuatro clústeres, los valores medios de B extractable en el muestreo de 2024 estuvieron por debajo del umbral crítico informado para soja y maíz por Bustos (2021) y Barbieri et al. (2024) ($0,76$ y $0,78 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente). De igual manera, en tres de los cuatro clústeres los valores medios de 2024 fueron inferiores a los del 2018 (**Figura 23**). Respecto a la situación prístina, los niveles de B del 2024 son del 47 al 61% más bajos, lo que indica claramente que el balance de B es negativo ($>$ extracción por granos y pérdidas por lavado que el ingreso al sistema).

Cuando se compara el mapa de disponibilidad de B del 2018 y 2024 se puede observar un crecimiento del área con niveles de B- AcNH_4 entre $0,5$ y 1 mg kg^{-1} a expensas de una reducción del área con niveles superiores a 1 mg kg^{-1} . Además, también se observó un crecimiento del área con niveles inferiores a $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ al sudoeste de Entre Ríos, norte o noreste de Buenos Aires (**Figura 24**). Como se mencionó, estos valores están por debajo de los umbrales críticos de maíz y soja (Bustos 2021; Barbieri et al., 2024) y pueden ser aún más limitantes para cultivos como el girasol. En este sentido, Balboa et al. (2011) trabajando en sur de Córdoba (Rio Cuarto), informaron respuesta al agregado de B en girasol de 444 a 544 kg ha^{-1} (incrementos del 15,3 al 30% respecto al testigo sin B), aun cuando el suelo presentaba niveles de B extractable de $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$.

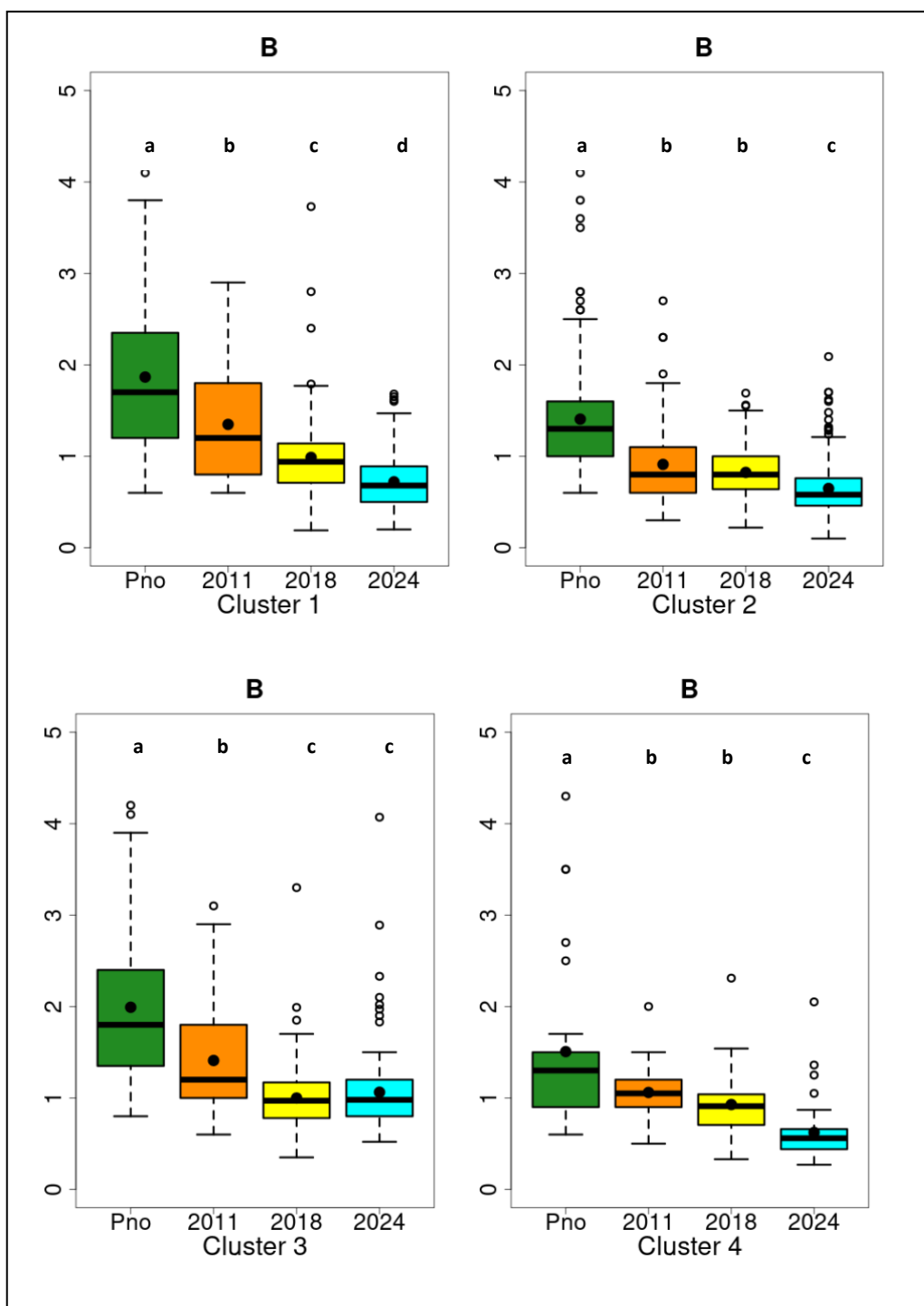


Figura 23. Evolución de los niveles de B-AcNH₄ (0-20 cm) en los distintos clústeres de la región pampeana. La línea horizontal dentro de la caja representa el valor de la mediana y el tamaño del bigote la dispersión de los datos que no son considerados outliers. El valor máximo y mínimo del bigote es 1.5 veces el rango intercuartílico del cuartil superior (Q3) e inferior (Q1), respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

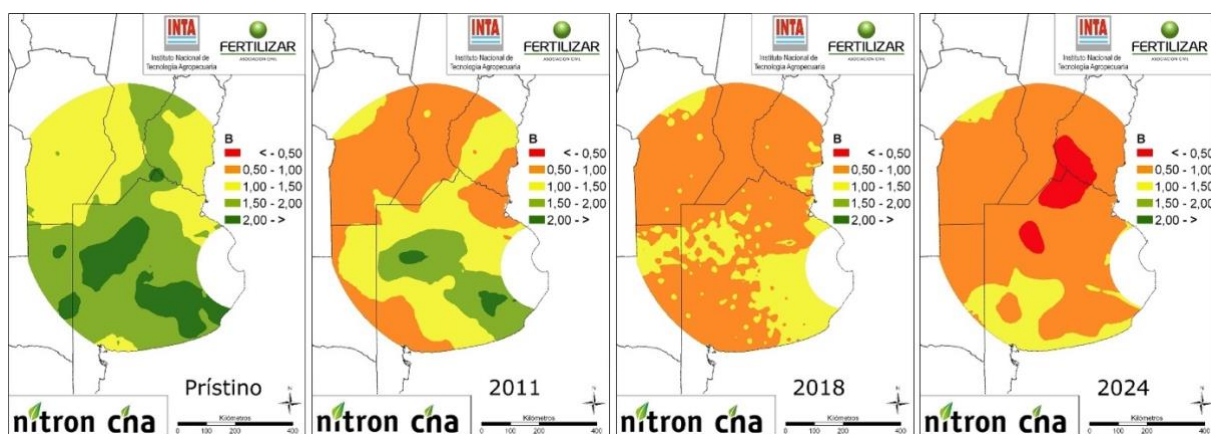


Figura 24. Niveles de B-AcNH₄ (ppm) en los 0-20 cm en suelos prístinos y agrícolas (2011, 2018 y 2024) de la región pampeana Argentina.

>>. CONCLUSIONES

Los niveles medios de MO no decrecieron entre el muestreo realizado en 2018 y 2024 aunque se observó una disminución al oeste de la RP. Sin embargo, los niveles actuales están muy por debajo de los niveles originales y algunas funciones del suelo en los agro-ecosistemas, como por ejemplo la de un adecuado abastecimiento de N y S y estabilidad de agregados están severamente afectadas.

El pH de los suelos se mantuvo estable respecto al muestreo realizado en 2018. Si bien estos niveles no serían limitantes para la mayoría de los cultivos (salvo leguminosas forrajeras), la mineralización de N podría verse afectada negativamente.

Los niveles de P-Bray aumentaron en algunas zonas al norte de la región pampeana respecto a lo determinado en 2018, lo que es explicado por una menor exportación de P en grano producto de las sequías ocurridas. No obstante, hubo un aumento considerable del área con menos de 10 mg kg⁻¹ al este de Entre Ríos. Existe un área importante con valores por debajo de 15 mg kg⁻¹, lo que, junto con la menor mineralización y adquisición de P del suelo por pérdida de estructura, procesos asociados a los bajos niveles de MO actuales, podrían constituir un escenario de alta frecuencia de deficiencia de P para la producción de los cultivos.

Los niveles actuales de Ca_i son en general elevados, pero respecto a 2018 creció el área con niveles menores a 1000 mg kg⁻¹ al oeste de la RP, valor que podría llegar a ser limitante. De igual manera, los niveles de Mg_i en general son elevados, pero respecto al muestreo anterior se incrementó el área con valores menores a 200 mg kg⁻¹ al norte de Buenos Aires, este de La Pampa y suroeste de Córdoba, valores que podrían ser deficientes. El K_i no cambió respecto al 2018 ya que el área con niveles de 200 a 400 mg kg⁻¹ en general se mantuvo, salvo al este de Entre Ríos donde se ve un crecimiento del área con menos de 200 mg kg⁻¹, valor que es limitante para la mayoría de los cultivos.

En cuanto a los micronutrientes, el Zn y el B serían en orden de importancia los micronutrientes más limitantes para el crecimiento de cultivos sensibles a su deficiencia en una vasta superficie de la región pampeana. No obstante, para el primero se observó un crecimiento del área con valores superiores a $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ al norte de la RP respecto al 2018, lo que podría atribuirse a un incremento del consumo de Zn que se quintuplicó entre el 2018 y el 2024. Los niveles de B en general continuaron disminuyendo respecto a 2018.

►► Agradecimientos

Los autores agradecen a FERTILIZAR Asociación Civil y Nitron-CNA por el financiamiento de la investigación.

>>. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, R & HS STEINBACH.** 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos» (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. p. 31-40.
- ARAMBURU MERLOS, F.A.; MONZÓN, J.P., MERCAU, J.L., TABOADA, M.; ANDRADE, F.H.; HALL, A.J.; GRASSINI, P.** 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184: 145-154.
- BALBOA, G.R.; ESPÓSITO, G.P.; CASTILLO, C.; BALBOA, R.** 2010. Estrategias de fertilización con boro en girasol. XXII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo, Rosario.
- BARBAGELATA, P. A. AND MALLARINO, A. P.** 2013. Field Correlation of Potassium Soil Test Methods Based on Dried and Field-Moist Soil Samples for Corn and Soybean. *Soil Science Society of Am. J.* 77: 318-327.
- BARBAZÁN, M.; BAUTES, C.; BEUX, L; BORDOLI, M.; CANO, JD; ERNST, O; GARCÍA A; FO GARCÍA & A QUINCKE.** 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agroc.* 15(2): 93-99.
- BARBIERI, P.A.; SAINZ ROZAS, H.R.; WYNGAARD, N.; EYHERABIDE, M.; REUSSI CALVO, N.I.; SALVAGIOTTI, F.; CORRENDON, A.; BARBAGELATA, P.A.; ESPÓSITO GOYA, G.; COLAZO, J.C.; ECHEVERRÍA, H.E.** 2017. Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn?, *Soil Science Soc. Am. J.* 81:556-563.
- BUNDY, L. G.** 2004. Corn fertilization. University of Wisconsin-Madison and University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. Cooperative Extension Publishing. 12 p.
- BUSTOS A.N., SAINZ ROZAS H.R., ALVAREZ C., BARBIERI P.A., EYERHABIDE M., WYNGAARD N.** 2019. Diagnóstico de la disponibilidad de zinc para el cultivo de soja. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Montevideo, Uruguay.
- CORRENDON, A; RUBIO, G; CIAMPITTI, IA; GARCÍA, FO.** 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- DIVITO, G.A., SAINZ ROZAS, H., ECHEVERRÍA, H.E., STUDDERT, G.A., WYNGAARD, N.** 2011. Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no-tillage. *Soil & Tillage Research*. 114: 117–126.
- ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.** 2015. Nitrógeno. Pp. 189-228. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- ELGALA, A.M. ISMAIL, A.S.; OSSMAN, M.A.** 1986. Critical levels of iron, manganese and zinc in Egyptian soils. *Journal of Plant Nutrition*. 9: 267-280.
- ESRI ArcMap 9.2** – – Licencia 37142261_v9 - del set ArcGIS Desktop.

- GARCÍA, F.O.; PICONE, L.I.; CIAMPITTI, I.A.** 2015. Fósforo. Pp. 229-264. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- GOLDMAN V; ECHEVERRÍA, H.E.; ANDRADE, F.; UHART, S.** 2002. Incidencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de nutrientes en maíz. Ciencia del Suelo 20 (1):27-35.
- KARAMANOS, R.E., GOH, T.B. AND HARAPIAK, J.T.** 2003. Determining wheat responses to copper in prairie soils. Can. J. Soil Sci. 83:213-221.
- KEREN, R.** (1996). Boron. In D. L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis, Part 3—Chemical methods (pp. 603–626). SSSA.
- KRUGER, G.A., KARAMANOS, R.E. AND SINGH, J.P.** 1985. The copper fertility of Saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 65:89-99.
- LINDSAY, W.L.** 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: J.J. Mortvedt, editor, Micronutrients in agriculture. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 90–111.
- LINDSAY, W.L., AND W.A. NORVELL.** 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:421–428.
doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.
- NAYYAR, V.K.; SADANA, U.S. AND TAKKAR, TN.** 1985. Methods and rates of application of Mn and its critical levels for wheat following rice on coarse textured soils. Fertilizer Research. 8: 173-178.
- RATTO, S.E.** 2006. Los microelementos en el Sistema productivo del área pampeana. Pp. 79-112. En: M. Vázquez (ed.). Micronutrientes en la agricultura. Diagnóstico y fertilización en la Argentina. La experiencia brasilera. Editorial Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.
- REUSSI CALVO, N.; ECHEVERRÍA, H.E. AND SAINZ ROZAS, H.** 2008. Usefulness of Foliar Nitrogen-Sulfur Ratio in Spring Red Wheat. JOURNAL OF PLANT NUTRITION. 31: 1612 - 1623.
- SAINZ ROZAS, H., EYHERABIDE, M; LARREA, G.; MARTÍNEZ CUESTA, N.; ANGELINI, H.; REUSSI CALVO, N.; WYNGAARD, N.** 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Actas del simposio de Fertilidad 2019.
<https://www.academia.edu/download/91926737/ActaSimposioFertilidad2019.pdf#page=141>.
- SIMS, J.T., AND G.V. JOHNSON.** 1991. Micronutrient soil tests. In: J.J. Mortvedt, editor, Micronutrients in agriculture. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 427–476.
- SIX, J; RT CONANT; EA PAUL & K PAUSTIAN.** 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C saturation of soils. Plant and Soil 241: 155-176.
- VÁZQUEZ, M.S; PAGANI, A.** 2015. Calcio y Magnesio. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos Pp. 317-355.



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL

