



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA

Ingeniería Agronómica

**Efecto de un sistema de producción intensificada
sobre el rendimiento y concentración de
nutrientes en granos de soja**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de:
Ingeniero Agrónomo**

Autor: María de la Riva

Tutores: Fernando H. Miguez y Daniela Becheran
Co tutores: Alberto Peper, Beltrán Bénédict.

Fecha de defensa:

Índice

Resumen	4
1. Introducción	4
2. Objetivos.....	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos particulares	8
3. Materiales y Métodos	8
3.1. Sitio experimental	8
3.2. Diseño del experimento	9
3.3. Manejo agronómico.....	11
3.4. Recopilación de datos	14
3.5. Análisis estadístico	14
4. Resultados y discusión	15
4.1. Rendimiento.....	15
4.1.1 Rendimiento y variables climáticas	16
4.1.2 Rendimiento y modelos de producción	18
4.1.3. Rendimiento y cultivo de cobertura	20
4.1.4. Rendimiento y rotación de cultivos	22
4.2. Concentración de nutrientes.....	24
4.2.1. Concentración de nutrientes y variables climáticas	25
4.2.2. Concentración de nutrientes y modelos de producción	26
4.2.3. Concentración de nutrientes y cultivo de cobertura	28
4.2.4. Concentración de nutrientes y rotación de cultivos	29
4.2.5. Correlación entre nutrientes	29
4.2.6. Concentración de nutrientes y rendimiento.....	30
5. Conclusiones	34
Anexo I	35
Anexo II: Gráficos de densidad de puntos.....	38
Anexo III: Cálculos disponibilidad de calcio.....	40
Anexo IV: Concentración de minerales en granos de soja por campaña dentro de cada sistema de rotación	41
Bibliografía.....	44

Resumen

Frente al aumento de la demanda de alimentos y la necesidad de proteger el medio ambiente, los sistemas agrícolas están evolucionando hacia un uso más intensivo y sostenible de los recursos. Estos nuevos enfoques de producción pueden tener implicaciones tanto en el rendimiento como en la calidad de los cultivos. En este estudio de larga duración realizado en Pergamino, se evaluó el efecto de diferentes prácticas agronómicas en el rendimiento y la calidad de los granos de soja, con el objetivo principal de comparar dos modelos de producción agrícola: uno con manejo agronómico convencional y otro sustentable e intensificado. Para lograr esto, se analizaron tres factores con diferentes niveles. En primer lugar, se consideró la presencia de cultivos de cobertura, dividiendo las parcelas en dos grupos: en la mitad se sembraron cultivos de cobertura de invierno, mientras que en la otra mitad se dejó en barbecho. Dentro de cada nivel (con y sin cultivos de cobertura), se aplicaron tres sistemas de rotación de cultivos diferentes: soja-soja, maíz-soja y trigo/soja-maíz-soja. Se recopilaron datos tanto de la soja principal sembrada como del cultivo de soja incluido en la rotación después del trigo en la misma temporada. El tercer factor evaluado fue el modelo de producción, que constaba de dos niveles: "Modelo Sustentable Intensificado" (SIM) y "Modelo Productor Promedio" (AFM), que empleaban diferentes prácticas de manejo. La rotación soja-soja solo se llevó a cabo bajo el modelo AFM, tanto en el caso de cultivos de cobertura como sin ellos, debido a que se considera que el monocultivo de soja no es compatible con la sostenibilidad. Los resultados obtenidos revelaron que el modelo sustentable intensificado logra rendimientos de soja superiores, así como niveles más altos de nitrógeno (N) y azufre (S) en los granos. La utilización de cultivos de cobertura afectó negativamente el rendimiento en algunas temporadas, pero no mostró un efecto consistente en la concentración de minerales en los granos. En cuanto a las rotaciones, se observaron rendimientos más bajos en el caso del monocultivo de soja, pero no se encontró un efecto constante de la rotación en la composición de los granos.

1. Introducción

El crecimiento esperado en la población mundial en la próxima década tendrá un fuerte impacto sobre la futura demanda de alimentos, fibras y biocombustibles. Según el informe *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031*, se prevé un incremento del 1,1% anual en la demanda mundial de productos básicos agrícolas (OECD/FAO, 2022). En este contexto, sumado a la limitada capacidad para expandir la superficie cultivada en el planeta (FAO, 2018), la intensificación se convierte en un concepto necesario a incluir al proyectar la producción agrícola del futuro. Resultará crucial diseñar y poner en práctica nuevas técnicas, sistemas y formas de producir que resulten en un uso más eficiente de los recursos.

Pero el objetivo no es solo lograr la seguridad alimentaria, sino también no comprometer las necesidades de la sociedad en un futuro. Por lo tanto, el gran desafío será desarrollar sistemas agrícolas sustentables más productivos, nutritivos y equitativos que a la vez

ayuden a conservar los recursos medioambientales y reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), responsables del cambio climático (Ignaciuk, A. et. Al; 2021).

En la producción agrícola se emplea el término “intensificación” para referirse a aquellos sistemas de producción que buscan incrementar los rendimientos por unidad de superficie o tiempo (Caviglia y Andrade, 2010). Este concepto puede abarcar diferentes técnicas como la implementación de determinadas rotaciones de cultivos que permiten sembrar un mayor número de especies en un mismo período de tiempo o una mayor inversión en insumos y germoplasmas (OECD/FAO, 2022). Otra alternativa para la intensificación de los sistemas agrícolas es la inclusión de cultivos de cobertura con el objetivo de aumentar el aporte de carbono en el suelo. (Caviglia y Andrade, 2010)

El término intensificación, el cual implica un mayor empleo de factores productivos, es muchas veces asociado a un uso irracional de insumos químicos por lo que puede parecer contradictorio a la concepción de sustentabilidad (Caviglia y Andrade, 2010). Sin embargo, estos dos conceptos no necesariamente son incompatibles. Caviglia y Andrade introducen el término “intensificación sustentable” como el proceso que utiliza recursos medioambientales (agua, nutrientes, radicación solar) de manera más intensa, manteniendo o incrementando los rendimientos de los cultivos por unidad de área y empleando, a la vez, prácticas agrícolas orientadas a la preservación del ambiente y de la salud humana. (Caviglia y Andrade, 2010). De esta manera, una agricultura sustentable intensificada implica un conjunto de estrategias dirigidas a lograr una alta tasa de utilización del suelo con cultivos adaptados a las condiciones ambientales, así como a favorecer la biodiversidad, mantener o mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, una nutrición balanceada y un manejo integrado de plagas.

El empleo de diferentes grados de intensificación dará lugar a nuevos modelos de producción orientados al aumento de los rendimientos pero que podrían tener efectos colaterales sobre otras variables de los cultivos.

En el presente trabajo se pretende analizar los posibles efectos de un modelo de “intensificación sustentable” sobre el rendimiento y el contenido de ciertos minerales en los granos de soja.

Modificaciones en el contenido de nutrientes en los granos de esta oleaginosa tendría dos principales implicancias. Por un lado, modificaría las propiedades nutricionales de la soja como alimento humano y animal. Al mismo tiempo, se modificarían los niveles de extracción de minerales del suelo.

Implicancias sobre la nutrición humana y animal

La soja se posiciona como la principal oleaginosa cultivada en el mundo en términos de producción habiéndose cosechado 355,59 millones de toneladas en la campaña 2021/22. (USDA, 2022) La Argentina es el tercer productor mundial de soja, solo superado por Estados Unidos y Brasil (USDA, 2022). Siendo una importante fuente de proteína y aceite de alta calidad (Bellaloui et al., 2010), este cultivo, así como sus productos y subproductos, son unos de los ingredientes más utilizados en las dietas animales, especialmente en la producción de aves y cerdos. Hoy en día, el 76% de la producción de

soja es destinada a la alimentación animal, el 20% a la alimentación humana (66% como aceite) y solo el 4% a productos industriales como biocombustibles y lubricantes (Fraanje y Garnett, 2020). Es importante destacar que cualquier cambio en la composición de la soja podría tener un impacto significativo en el equilibrio nutricional de las dietas diseñadas para la alimentación animal.

En este trabajo fueron analizados los contenidos de nitrógeno, fósforo, azufre, magnesio, calcio y potasio. Todos ellos son considerados macroelementos esenciales para el organismo animal (Fraanje y Garnett, 2020).

Implicancias sobre la nutrición del suelo y composición química de los granos

La principal vía de extracción de nutrientes del suelo se da durante la cosecha de los granos (García y González, 2012). Los niveles de extracción resultan de una combinación entre el peso de los granos cosechados y la composición mineral de los mismos. Modificaciones en el contenido de nutrientes alteraría las necesidades de reposición de minerales en el suelo. Este efecto tendría una especial importancia en la Argentina, en donde los niveles de reposición de nutrientes son notablemente bajos (Melgar, 2014). En comparación con los otros dos principales países productores de soja, en nuestro país se repone un menor porcentaje de los nutrientes removidos.

Tabla 1: *Reposición/remoción - Estimaciones realizadas por la asociación civil "Fertilizar" (Melgar, 2011)*

	N	P	K
Brasil	117%	220%	150%
EEUU	79%	79%	54%
Argentina	66%	54%	2%

La actividad agrícola en estas condiciones de manejo ha llevado a la pérdida de fertilidad en los suelos argentinos. La escasa reposición del P extraído ha resultado en la disminución del P disponible, y algunas áreas han pasado de rangos de valores promedio altos ($> 20 \text{ mg kg}^{-1}$) a medios ($10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$) o de rangos medios a bajos (Montoya et al., 1999; García, 2001). En un estudio llevado a cabo en la región pampeana por Rozas, junto a otros colaboradores, se hallaron disminuciones del calcio, magnesio y potasio de alrededor del 12%, 18% y 23,5% respectivamente en el área relevada. (Rozas et al., 2013)

Dentro de los principales cultivos del país, las dosis de fertilizantes aplicadas son particularmente menores en la producción de soja. Por ejemplo, para el período 2008-11, la relación de remoción/aplicación de fósforo en soja fue del 6,2; mientras que este valor fue de 0,5 en trigo y 0,9 en girasol y maíz. (García y González, 2012)

La composición química de los granos se encuentra controlada genéticamente haciendo que existan diferencias entre variedades (Biel et. al., 2018). Sin embargo, estudios previos han demostrado que también intervienen factores ambientales y de manejo agronómico. Variaciones ocurridas en las concentraciones de compuestos nutricionales en granos de soja pueden ser explicadas como consecuencia de variaciones en variables ambientales medidas durante el período de llenado de granos (Marioli Nobile, 2016). En su

experimentación, Marioli Nobile C. halló que temperaturas medias máximas superiores a 30,1°C se asocian a incrementos significativos de Ca, Mg y Mn; mientras que máximas mayores a 28 °C se relacionan con incrementos significativos en Fe y Co.

Existe evidencia de que sistemas de rotación con maíz resultan en mayores concentraciones de Fe, P y B en los granos de soja en comparación con el monocultivo de soja (Bellaloui et.al., 2010). Bellaloui et. Al. (2010) sugirieron que este efecto se debe al incremento en los niveles de Fe, P y B en el suelo al incorporar el cultivo de maíz en la rotación.

El uso de fertilizantes puede afectar diferentes componentes de los granos. Davéréde et.al. (2019) encontraron que aplicaciones de P y S incrementan la concentración de proteínas en los granos de soja, en especial cuando son aplicados en altas dosis. Por otro lado, trabajos realizados por Soliman y Farah (1985) así como Krueger et.al. (2012) concuerdan con que a mayores dosis de P aplicado aumenta la concentración de P y K en los granos.

En un estudio conducido por Biel et.al (2018) en el que se comparaba la producción de soja bajo un sistema convencional y uno orgánico, este segundo sistema resultó en menores concentraciones de P, K, Ca, Cu y Ni en los granos. En este mismo ensayo, la soja sembrada a una distancia de 22.5 cm contuvo más Cu y Ni que en espaciamientos de 35 cm. La distancia de siembra no tuvo efecto significativo sobre el contenido de los macronutrientes estudiados.

En la **Tabla 2** se presentan las concentraciones de los diferentes nutrientes en granos de soja a cosecha presentados en dos publicaciones de IPNI (Ciampitti, I. A., García, F. O., 2007; INPOFOS, 2002). Fueron calculados los promedios entre ambos valores para cada nutriente. Estos promedios serán tomados como referencia para el análisis de los resultados de este trabajo.

Tabla 2: Cantidad de nutriente total extraído en los granos, expresado en gramo de nutriente por kilogramo de grano en base seca

	IPNI (2002)	IPNI (2007)	Promedio
N (gr/Kg)	60	55	57,5
P (gr/Kg)	6,72	6	6,36
S (gr/Kg)	4,69	3	3,845
Mg (gr/Kg)	2,7	4	3,35
Ca (gr/Kg)	3,04	3	3,02
K (gr/Kg)	19,47	19	19,235

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de dos modelos de producción, que difieren en su grado de intensificación, sobre el rendimiento y la extracción de N, P, S, K, Ca y Mg en granos de soja.

Hipótesis

- a) El sistema sustentable intensificado (SIM) tiene un efecto positivo sobre los rendimientos de soja de primera y soja de segunda.
- b) Los mayores aportes de nutrientes (P, S, Ca) en el sistema sustentable intensificado, debido a mayores dosis de fertilizantes, aumenta la concentración de estos minerales en los granos de soja.

2.2. Objetivos particulares

- Comparar las concentraciones de minerales halladas con previas publicaciones.
- Comparar el rendimiento y calidad de los granos entre rotaciones de cultivos.
- Evaluar el efecto del uso de cultivos de cobertura sobre el rendimiento y calidad de los granos de soja
- Relacionar el rendimiento de soja y la concentración de nutrientes, con condiciones ambientales dentro de cada campaña.
- Realizar un análisis de regresión entre el rendimiento del cultivo y la concentración de nutrientes, así como entre el rendimiento y la extracción de nutrientes por hectárea

Este trabajo se realiza en el marco de un acuerdo entre la firma Monsanto srl y la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias UCA, utilizando datos de un ensayo de larga duración que conduce dicha empresa.

3. Materiales y Métodos

3.1. Sitio experimental

El ensayo de larga duración fue llevado a cabo en la Estancia Don Eduardo, ubicada en el partido de Pergamino, provincia de Buenos Aires, Argentina (33° 51'55.7" S; 60° 40'28.39" W). Iniciado en el año 2014, el estudio comprende los datos de siete campañas: 2014-15, 2015-16, 2016-17, 2017-18, 2018-19, 2019-20 y 2021-22.

La campaña 2020-21 no fue incluida en el análisis por no contarse con los datos de la misma.

El clima es húmedo subtropical con lluvias distribuidas homogéneamente a lo largo del año que promedian los 972 mm anuales (precipitaciones promedio para el período 1910-2009). La temperatura media anual es de 16,55 °C; el mes más cálido es enero (23,4°C) y el más frío julio (9,8°C) (promedios del período 1967-2009).

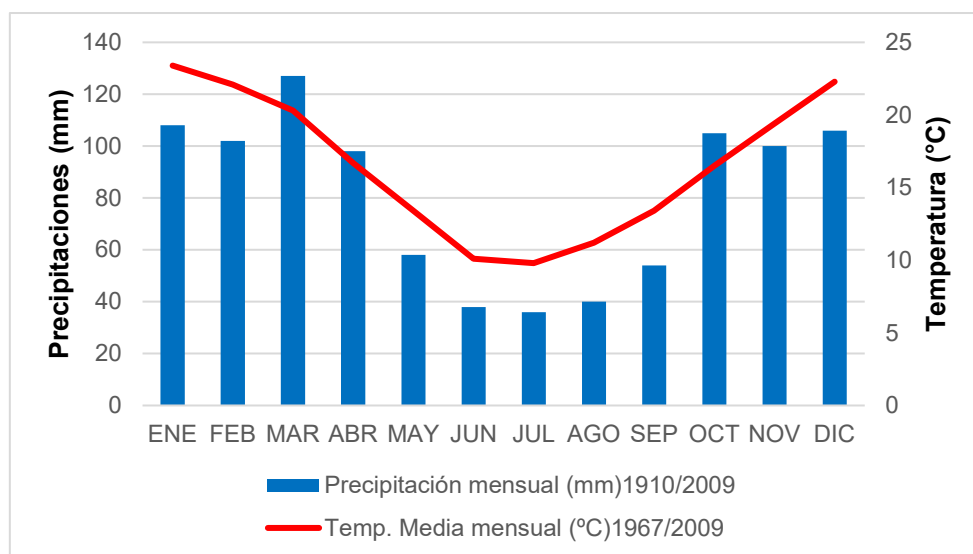


Figura 1: Precipitaciones medias mensuales en mm (promedio 1910-2009) y temperaturas medias mensuales en °C (promedio 1967-2009) en Pergamino, Buenos Aires, Argentina. (EEA INTA Pergamino)

El suelo es un Molisol, argiudol típico de la serie Pergamino, rico en arcillas, bien drenado y con un horizonte superficial rico en materia orgánica. A continuación, se presenta una tabla con los datos arrojados por el análisis del suelo realizado previo al inicio del ensayo.

Tabla 3: Características del suelo en el sitio experimental (Argiudol típico serie Pergamino)

Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	pH	MOS (%)	CIC (meq 100 g-1)	HE (%)
Ap	0-20	Franco-limoso	22	68,8	9,2	5,9	2,6	21,1	25,5
Bt1	20-65	Arcillo- limoso	42	52,3	5,7	6,1	2,5	20,3	24,7
Bt2	65-95	Franco arcillo- limoso	26	64,5	9,5	6,2	1,5	18,6	27,3
BC	95-120	Franco-limoso	16	72,5	11,5	6,3	1,1	32	37,7
C	>120	Franco-limoso	16	74,1	9,9	6,5	0,6	27,2	31,3

- MOS: materia orgánica del suelo.
- CIC: capacidad de intercambio catiónico.
- HE: humedad equivalente.

3.2. Diseño del experimento

El experimento constó de tres factores con sus respectivos niveles: existencia de cultivos de cobertura, rotación de cultivos y modelo de producción.

Para reducir la variabilidad ambiental, la superficie experimental fue dividida en tres bloques (A, B y C) de acuerdo con un gradiente ambiental definido por dos criterios: elevación del terreno y contenido de materia orgánica en el suelo. Los tratamientos fueron asignados de manera independiente dentro de cada bloque, permitiendo tres repeticiones de cada tratamiento por campaña.

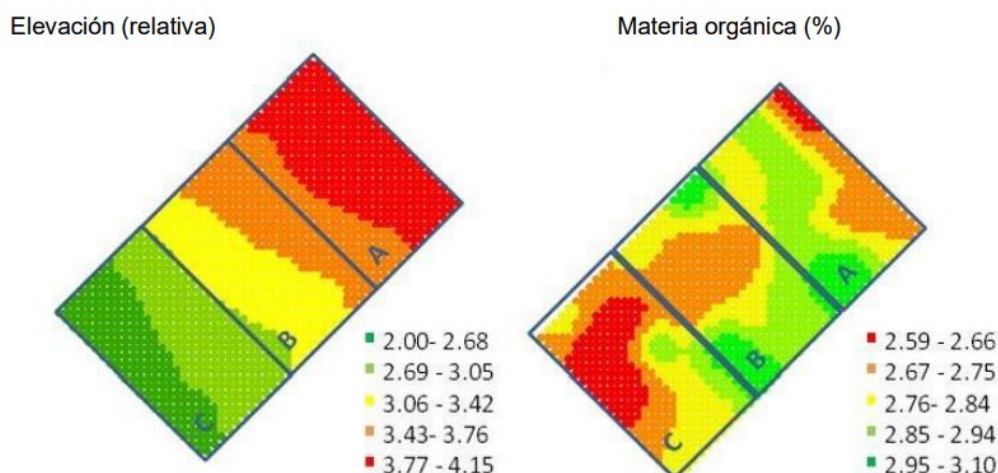


Figura 2: División del terreno en bloques A, B y C. Figura extraída de Valdetaro, M. Uso de nutrientes en secuencias de cultivos con niveles de intensificación contrastantes (Proyecto de trabajo final de ingeniero agrónomo). Universidad de Buenos Aires

Los bloques fueron divididos en parcelas de 7,28 m de ancho y 100 m de largo, permitiendo la siembra de 14 surcos a 0,52 m. El experimento ocupa un área de 48.048 m², siendo en total 6 hectáreas y 60 m² (incluyendo los caminos para el tránsito de la maquinaria). A cada parcela, consideradas como unidades experimentales, se les asignó uno de los 10 tratamientos posibles, resultantes de la combinación de los niveles de los tres factores. El tratamiento asignado se mantuvo en cada parcela durante los años que duro el ensayo.

Tabla 4: tratamientos resultantes de la combinación de los diferentes niveles de cada factor. (CC: cultivo de cobertura; SCC: sin cultivo de cobertura; AFM: “average farmer model”; SIM: “sustainable intensified model”)

			Tratamiento
SCC	Sj-Sj	AFM	1
	Mz-Sj	AFM	3
		SIM	4
	Tr/sj-Mz-Sj	AFM	7
		SIM	8
CC	Sj-Sj	AFM	2
	Mz-Sj	AFM	5
		SIM	6
	Tr/sj-Mz-Sj	AFM	9
		SIM	10

El factor “cultivos de cobertura” constó de dos niveles que fueron aplicados en partes iguales y de manera aleatoria dentro de cada bloque. En cada campaña, en la mitad de las parcelas se sembraron cultivos de cobertura de invierno, previo a la siembra de cultivos de verano (soja y maíz). En la otra mitad de las parcelas no se sembraron cultivos de cobertura, definiéndose este nivel como “barbecho”.

Dentro de cada nivel (con y sin cultivos de cobertura) se aplicaron tres diferentes sistemas de rotación de cultivos: Soja-Soja, Maíz-Soja y Trigo/soja-Maíz-Soja. En el estudio se utilizaron los datos registrados tanto de la soja sembrada como cultivo principal (“soja de primera”) como de la soja incluida en la rotación luego del trigo en la misma campaña (“soja de segunda”).

El último factor, modelo de producción, comprende dos niveles: “Modelo Sustentable Intensificado” (SIM, por sus siglas en ingles) y “Modelo Productor Promedio” (AFM, por sus siglas en ingles). Cada modelo involucra diferentes prácticas de manejo descriptas con mayor detalle en la sección “Manejo agronómico” de este trabajo. Como excepción, la rotación Soja-Soja solo fue sembrada bajo el modelo AFM, tanto en el caso CC como SCC, por considerarse al monocultivo de soja incompatible con la sustentabilidad.

A su vez, cada tratamiento fue repetido tantas veces como cultivos contiene la rotación correspondiente, de manera tal que en todas las campañas estuvieran presentes todos los cultivos que comprende cada tratamiento.

Considerando los tres factores con sus respectivos niveles y las repeticiones correspondientes para cada rotación, se sembraron 22 parcelas por bloque y, en consecuencia, 66 parcelas por campaña.

Tabla 5: Disposición de los tratamientos dentro de cada bloque y para tres campañas consecutivas

		2014-15		2015-16		2016-17	
		SCC	CC	SCC	CC	SCC	CC
Sj-Sj	AFM	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
	SIM	Soja	Soja	Maíz	Maíz	Soja	Soja
Mz-Sj	AFM	Soja	Maíz	Maíz	Soja	Soja	Maíz
	AFM	Maíz	Soja	Soja	Maíz	Maíz	Soja
	SIM	Maíz	Maíz	Soja	Soja	Maíz	Maíz
	SIM	Maíz	Maíz	Soja	Soja	Trigo/soja	Trigo/soja
Mz-Sj- Tr/sj	AFM	Maíz	Maíz	Soja	Soja	Trigo/soja	Trigo/soja
	AFM	Soja	Soja	Trigo/soja	Trigo/soja	Maíz	Maíz
	SIM	Soja	Soja	Trigo/soja	Trigo/soja	Maíz	Maíz
	SIM	Trigo/soja	Trigo/soja	Maíz	Maíz	Soja	Soja
	AFM	Trigo/soja	Trigo/soja	Maíz	Maíz	Soja	Soja
	AFM	Trigo/soja	Trigo/soja	Maíz	Maíz	Soja	Soja

3.3. Manejo agronómico

Todas las siembras de soja fueron realizadas bajo siembra directa y a una distancia entre surcos de 52 cm; con excepción de la campaña 2021/22 en la cual, para la siembra de soja de segunda y las parcelas “SIM” de soja de primera, se utilizó una distancia de 35 cm.

Con excepción de la soja de segunda en 2017/18 y la soja de primera en 2019/20, todas las parcelas de soja de una misma campaña fueron sembradas con no más de dos días de diferencia. Las siembras se realizaron en los meses de octubre a diciembre en el caso de la soja de primera y en el mes de diciembre en el caso de la soja de segunda.

Previo a la siembra, las semillas fueron adecuadamente tratadas con inoculante de *Bradyrhizobium sp.*

Las prácticas agronómicas difirieron entre ambos grados de intensificación en términos de fertilización y germoplasmas utilizados.

Con el “Modelo Productor Promedio”, AFM por sus siglas en inglés (“Average Farmer Model”), se buscó representar al manejo convencional de los productores de la zona. Bajo este modelo se utilizaron variedades frecuentemente sembradas por los productores del lugar, así como fertilizaciones fosforadas con dosis y fuentes consideradas habituales en la zona.

El “Modelo Sustentable Intensificado” o SIM (“Sustainable Intensified Model”) fue diseñado con prácticas orientadas a alcanzar mayores rendimientos y hacer así un uso más eficiente del suelo. Con este objetivo, se utilizaron germoplasmas considerados superiores según los resultados de ensayos locales. En cuanto a la fertilización, se utilizaron mayores dosis de fósforo y se añadió la fertilización con azufre. Las fuentes y dosis de nutrientes aplicadas se detallan en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Dosis, fuentes y momentos de aplicación de fertilizantes en los cultivos de soja de primera y segunda. Para el caso de la soja de segunda se agrega las dosis aplicadas al cultivo de trigo precedente.

Campaña	Modelo	Soja de primera	Soja de segunda
2014-15	AFM	45 Kg SPT/ha	45 Kg SPT/ha
	SIM	145 Kg SPT/ha	145 Kg SPT/ha
2015-16	AFM	80 Kg SPT/ha a la siembra	(Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	170 Kg SPT/ha en barbecho 92 Kg SCa en barbecho	(Trigo: 170 Kg SPT/ha y 92 Kg SCa/ha)
2016-17	AFM	90 Kg SPS/ha a la siembra	(Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	170 Kg SPS/ha en barbecho 92 Kg SCa/ha en barbecho	(Trigo: 170 Kg SPT/ha y 92 Kg SCa/ha)
2017-18	AFM	80 Kg SPT/ha a la siembra	80 Kg SPT/ha a la siembra (Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	200 Kg Sausor/ha en barbecho 60 Kg Sausor/ha a la siembra	60 Kg Sausor/ha (Trigo: 200 Kg Sausor/ha, 100 Kg Nitrocomplex/ha y 150 Kg Nitrodoble/ha)
2018-19	AFM	80 Kg SPT/ha a la siembra	80 Kg SPT/ha a la siembra (Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	170 Kg SPT/ha en barbecho 60 Kg Sausor/ha a la siembra	(Trigo: 170 Kg Sausor/ha, 100 Kg Nitrocomplex/ha y 250 Kg Nitrodoble/ha)
2019-20	AFM	60 Kg SPT/ha a la siembra	60 Kg SPT/ha a la siembra (Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	150 Kg Sausor/ha en barbecho 80 Kg Sausor/ha a la siembra	(Trigo: 150 Kg Sausor/ha, 100 Kg Nitrocomplex/ha y 450 Kg Nitrodoble/ha)
2021-22	AFM	60 Kg SPT/ha a la siembra	60 Kg SPT/ha a la siembra (Trigo: 80 Kg SPT/ha)
	SIM	120 Kg SPT/ha en barbecho 30 Kg Microstar CMB BIO/ha a la siembra	(Trigo: 120 Kg SPT/ha, 30 Kg Nitrocomplex/ha y 200 Kg Nitrodoble/ha)

- SPT: superfosfato triple (0:46:0:0).
- SPS: superfosfato simple (0:20:0, S: 12%).
- SCa: sulfato de calcio (S: 18.6%).
- Nitrodoble (27-0-0 + 6% CaO + 4% Mg)
- Nitrocomplex (21-17-3 + 1% MgO + 5% S + 0,1% Zn)
- Sausor (3-30-0 + 22% CaO + 6% S)
- Microstar CM BIO

El control de malezas fue realizado considerando la densidad y especies presentes en las parcelas. Las dosis y productos herbicidas aplicados no difirieron entre ambos modelos. Para el control de insectos se utilizaron piretroides.

En las siguientes tablas se resumen las fechas y prácticas de manejo más relevantes dentro de cada campaña y para cada combinación de factores.

Tabla 7: Manejo agronómico soja de primera

Campaña	Sistema	Fecha de Siembra	Fecha de Cosecha	Cultivar
2014-15	AFM	24/10/2014	21/04/2015	DM 4670
	SIM			DM4614IPRO
2015-16	AFM	12/12/2015	05/05/2016	DM4612
	SIM			DM4614IPRO
2016-17	AFM	10/11/2016	21/04/2017	DM4612
	SIM			DM4736IPRO
2018-19	AFM	7/11/2018	5/4/2019	DM4612
	SIM			AW4326IPRO
2019-20	AFM	13/11/2019 (CC) y 2/12/2019 (SCC)	14/4/2020	DM4612
	SIM			AW4736IPRO
2021-22	AFM	09/11/2021	08/04/2022	DM46R18
	SIM	11/11/2021		DM46I20 IPRO

Tabla 8: Manejo agronómico soja de segunda

Campaña	Sistema	Fecha de Siembra	Fecha de Cosecha	Cultivar
2014-15	AFM	19/12/2014	21/04/2015	DM 4670
	SIM			DM4614IPRO
2015-16	AFM	12/12/2015	05/05/2016	DM4612
	SIM			DM4614IPRO
2016-17	AFM	14/12/2016	21/04/2017	DM4612
	SIM			DM4736IPRO
2017-18	AFM	9/11/2017 (CC) y 8/12/2017 (SCC)	4/4/2018	DM4612
	SIM			AW4326IPRO
2018-19	AFM	07/12/2018	10/04/2019	DM4612
	SIM			AW4326IPRO
2019-20	AFM	2/12/2019	14/04/2020	DM4612
	SIM			AW4736IPRO
2021-22	AFM	02/12/2021	20/04/2022	DM46R18
	SIM			DM46I20 IPRO

Como cultivo de cobertura se utilizó una mezcla de triticale (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) y vicia villosa (*Vicia villosa* Roth). Estas especies invernales fueron sembradas en otoño, previo a los cultivos de soja y maíz. Dichos cultivos de servicio fueron terminados en primavera aplicando glifosato [N-(phosphonomethyl) glycine] antes de la siembra de los cultivos de verano.

3.4. Recopilación de datos

La información climática fue obtenida de una estación meteorológica (IMT 300, Pessl, Weiz, Austria), ubicada a 100 m del experimento, en la cual diariamente se registraban los datos de temperatura del aire y del suelo ($^{\circ}\text{C}$, precisión de $0,1^{\circ}\text{C}$), humedad relativa del aire (% precisión del 1%), humedad foliar, radiación solar (W m^{-2}), precipitaciones (mm, mínimo: 0,2 mm) y velocidad del viento (m s^{-1}). Estos datos fueron complementados con la información proporcionada por la Estación Experimental de Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

A lo largo del ciclo del cultivo se registraron las fechas de los eventos fenológicos (emergencia, floración y madurez fisiológica). La cosecha fue realizada con máquinas especializadas para captar las hileras centrales de cada parcela. Para conocer el rendimiento de los cultivos, el cual fue expresado en kilogramos por hectárea (Kg/ha), los granos fueron previamente secados a una temperatura de 70°C hasta alcanzar un peso constante.

Las muestras de granos de cada parcela fueron tomadas al momento la cosecha para su análisis. Las concentraciones de minerales en los granos fueron determinadas mediante métodos habituales de análisis según “Methods of Soil Analysis”, SSSA, 1996; “Cuadernillo de métodos de análisis de suelo y plantas” de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 1997; y notas del SAMLA (Sistema de Apoyo Metodológico de Laboratorios de Suelos y Agua).

3.5. Análisis estadístico

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las diferentes variables se realizaron análisis de varianza (ANVA) mediante el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2011). Las asociaciones entre diferentes variables fueron establecidas por medio de análisis de regresión. Las diferencias en las medias se analizaron a través del test de LSD ($p < 0,05$).

Para el análisis del efecto del modelo de producción sobre el rendimiento en soja de primera (Sj1) se excluyeron los datos de la rotación Sj-Sj para eliminar posibles efectos del sistema de rotación ya que no se sembró soja sobre soja en el modelo SIM.

Por este mismo motivo, para el análisis del efecto del sistema de rotación de cultivos se excluyeron los datos de aquellas parcelas producidas bajo el modelo SIM para eliminar

el efecto del modelo de producción. Los datos de Sj2 tampoco fueron considerados en este análisis ya que la soja de segunda solo corresponde a la rotación Mz-Sj-Tr/Sj.

4. Resultados y discusión

4.1. Rendimiento

En las siguientes tablas y gráficos se resumen los resultados de los rendimientos para soja de primera (Sj1) y soja de segunda (Sj2), expresados en kilogramos por hectárea, clasificados según diferentes variables.

Tabla 9: Rendimientos promedio de soja de primera (Sj1) y soja de segunda (Sj2) en las siete campañas analizadas. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Cultivo	n	Media	D.E.	CV
Sj1	210	3352,90	982,52	29,30
Sj2	84	2568,59	700,86	27,29

Los rendimientos de Sj1 fueron, en promedio total de todos los tratamientos y campañas, significativamente mayores a los de Sj2 (**Tabla 9**). Esta diferencia fue significativa en todas en las campañas con excepción de la campaña 2019-20.

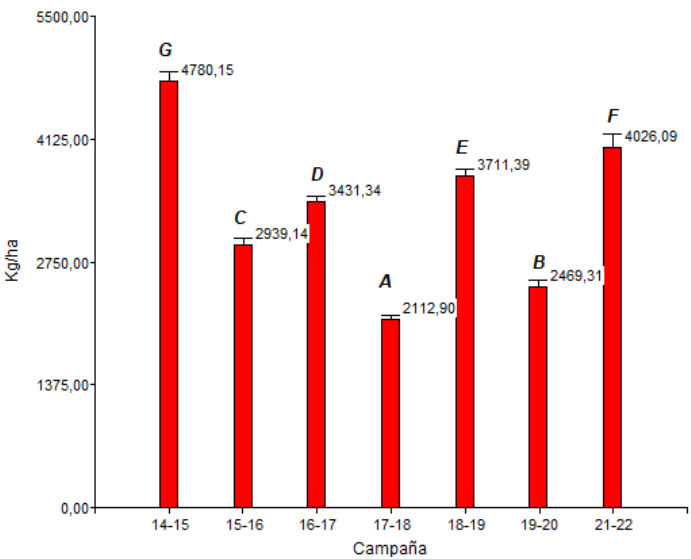


Figura 3: Rendimientos promedio de Sj1 por campaña. Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

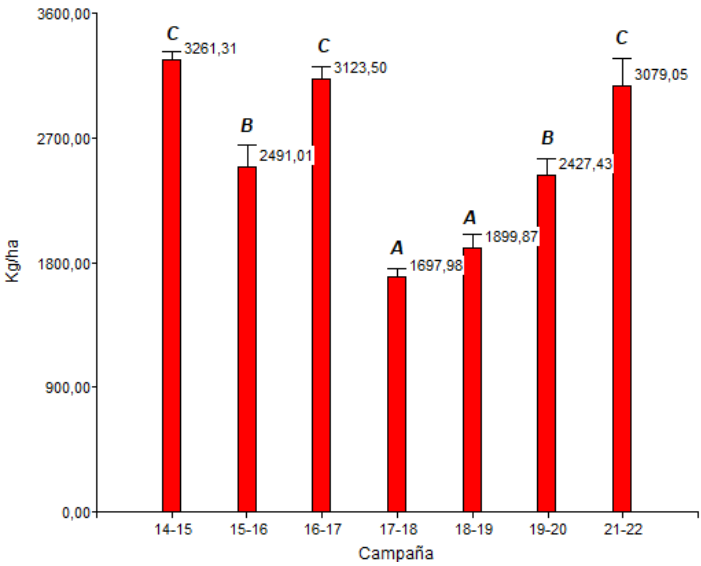


Figura 4: Rendimientos promedio de Sj2 por campaña. Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

En la campaña 2014-15 se alcanzó el mayor rendimiento promedio tanto para Sj1 como Sj2. Por otro lado, en 2017-18 se obtuvieron los menores rendimientos para ambos cultivos.

4.1.1 Rendimiento y variables climáticas

Se evaluó la respuesta del rendimiento en función de las variables climáticas en promedio dentro de cada campaña separando Sj1 de Sj2. Para ello se utilizaron datos climáticos diarios medidos durante el período crítico de los cultivos. Como período crítico de Sj1 se tomaron los meses de enero, febrero y marzo; para Sj2 se emplearon los datos de febrero, marzo y abril. Se considera que en estos meses el cultivo está atravesando el periodo crítico para la definición del número y del peso de los granos en soja.

Tabla 10: Rendimientos promedio y caracterización climática de cada campaña para soja de primera (Sj1). Ppt (mm): suma de precipitaciones durante el período crítico; Temp (°C): temperatura promedio del período crítico (°C), Rad (MJ/m2/día): radiación solar promedio durante el período crítico. *Datos faltantes

	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	21-22
Rendimiento (Kg/ha)	4780,15	2939,14	3431,34	2112,9	3711,39	2469,31	4026,09
Ppt (mm)	313	352	336	102	347	319	404
Temp (°C)	21,54	22,71	21,97	21,94	21,04	22,11	20,99
Rad (MJ/m2/día)	22,72	22,30	20,14	23,80	21,69	22,70	*

Tabla 11: Rendimientos promedio y caracterización climática de cada campaña para soja de segunda (Sj2). Ppt (mm): suma de precipitaciones durante el período crítico; Temp (°C): temperatura promedio del período crítico (°C), Rad (MJ/m2/día): radiación solar promedio durante el período crítico. *Datos faltantes

	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	21-22
Rendimiento (Kg/ha)	3261,31	2491,01	3123,50	1697,98	1899,87	2427,43	3079,05
Ppt (mm)	142	403	336	235	180	342	294
Temp (°C)	20,47	19,50	19,60	20,85	19,01	19,94	18,01
Rad (MJ/m2/día)	18,97	16,62	15,63	17,70	17,75	17,42	*

Los bajos rendimientos de la campaña 17-18 en Sj1 podrían ser explicados por las bajas precipitaciones registradas en el período enero-marzo. Sin embargo, las campañas con menores precipitaciones durante el período febrero-abril no fueron las de menores rendimientos en la Sj2. El menor rendimiento de Sj2 se presentó en 17-18, con precipitaciones normales de febrero a abril en relación al resto de las campañas. Podría concluirse que, como periodo crítico de la Sj2, sería más acertado considerar los meses de enero, febrero y marzo.

Por otro lado, se evaluó la respuesta del rendimiento en función de las variables climáticas en promedio de todos los tratamientos y campañas.

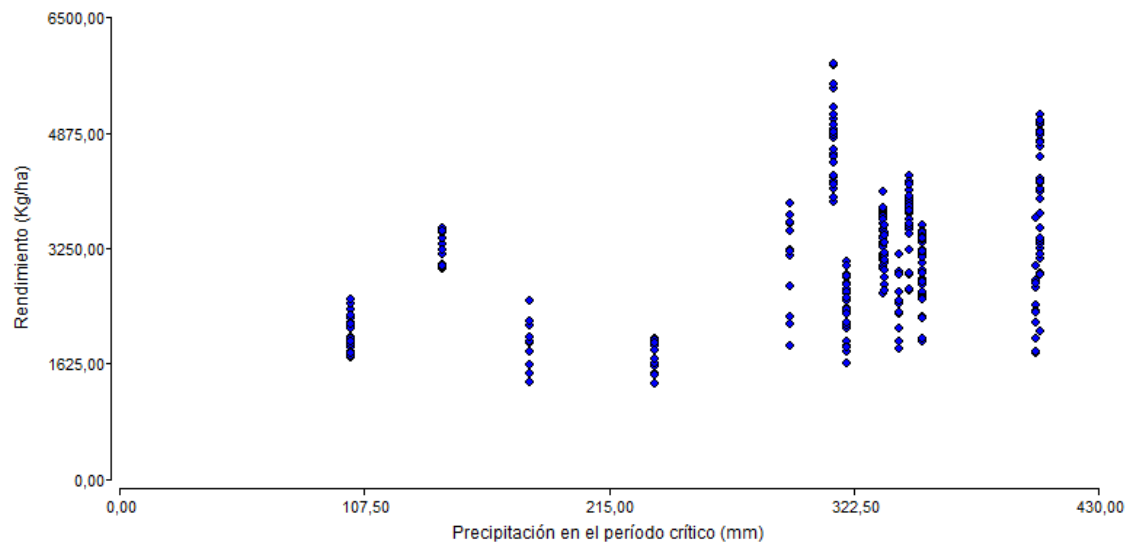


Figura 5: Rendimiento (kg/ha) sobre las precipitaciones (mm) durante el período crítico.

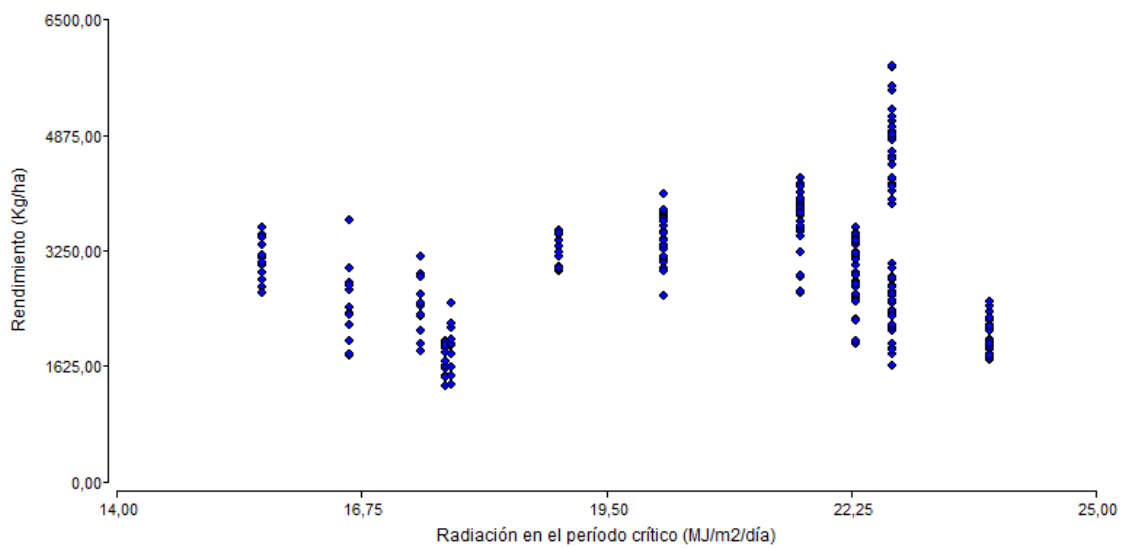


Figura 6: Rendimiento (kg/ha) sobre la radiación solar promedio (MJ/m²/día) durante el período crítico

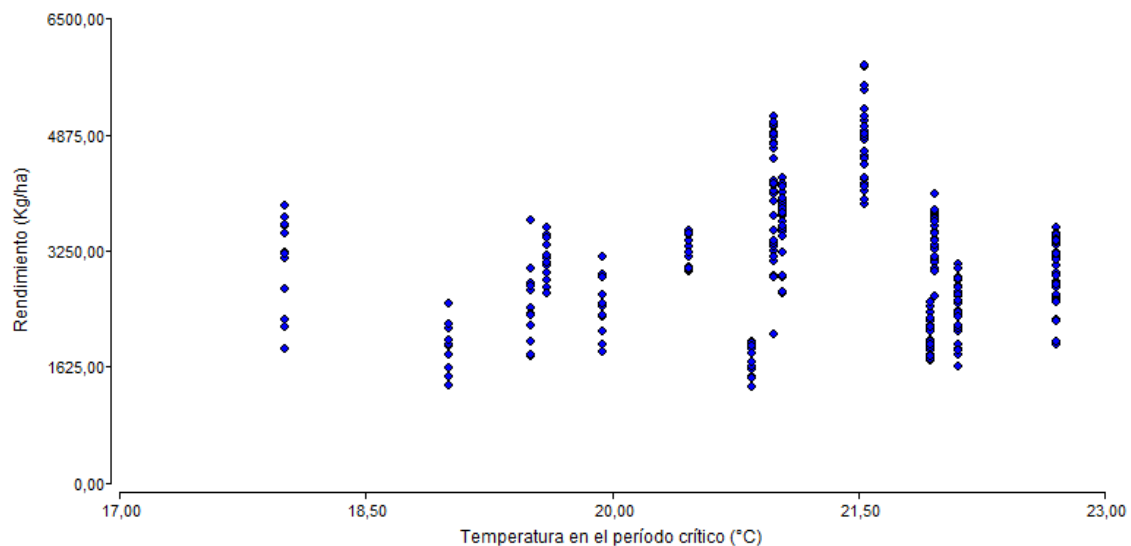


Figura 7: Rendimiento (kg/ha) sobre la temperatura diaria promedio (°C) durante el período crítico.

Ninguna de las variables climáticas estudiadas pudo explicar de manera consistente los rendimientos.

4.1.2 Rendimiento y modelos de producción

Para comparar los rendimientos bajo ambos modelos de producción se realizaron análisis de la varianza, tomando los datos de Sj1 y Sj2 por separado. Posteriormente, debido a las diferencias significativas halladas entre campañas (**Figura 3 y Figura 4**), este análisis fue repetido dentro de cada campaña para eliminar dicho efecto ambiental.

Tabla 12: Rendimientos promedio de Sj1 dentro de cada modelo de producción. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Modelo	n	Media	D.E.	CV	
AFM	84	3282,24	903,49	27,53	A
SIM	84	3601,49	1031,77	28,65	B

Tabla 13: Rendimientos promedio de Sj2 dentro de cada modelo de producción. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Modelo	n	Media	D.E.	CV	
AFM	42	2363,42	663,89	28,09	A
SIM	42	2773,76	683,67	24,65	B

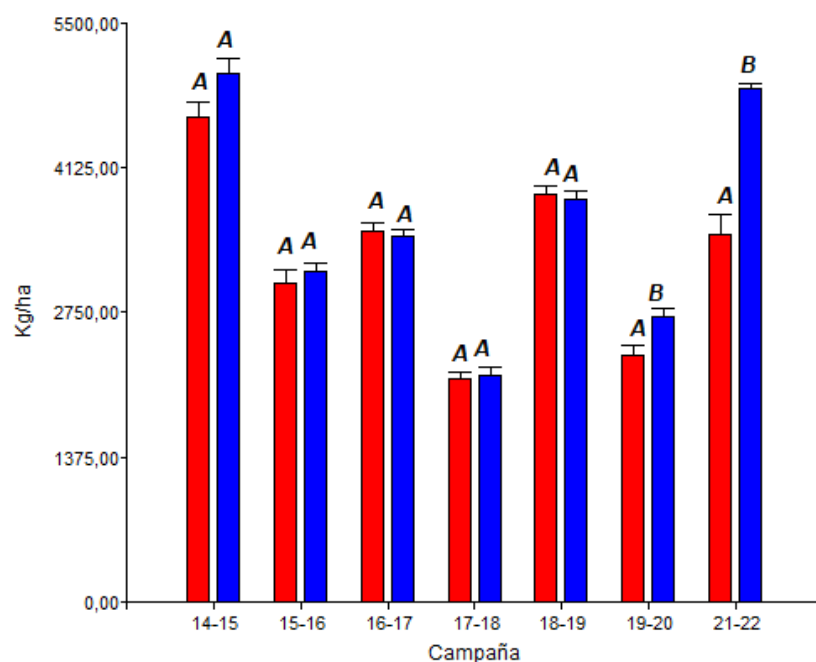


Figura 8: Rendimientos promedio de soja de primera (Sj1) en cada campaña diferenciando por sistema de producción. Los colores indican distintos tratamientos. (rojo: AFM, azul: SIM). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

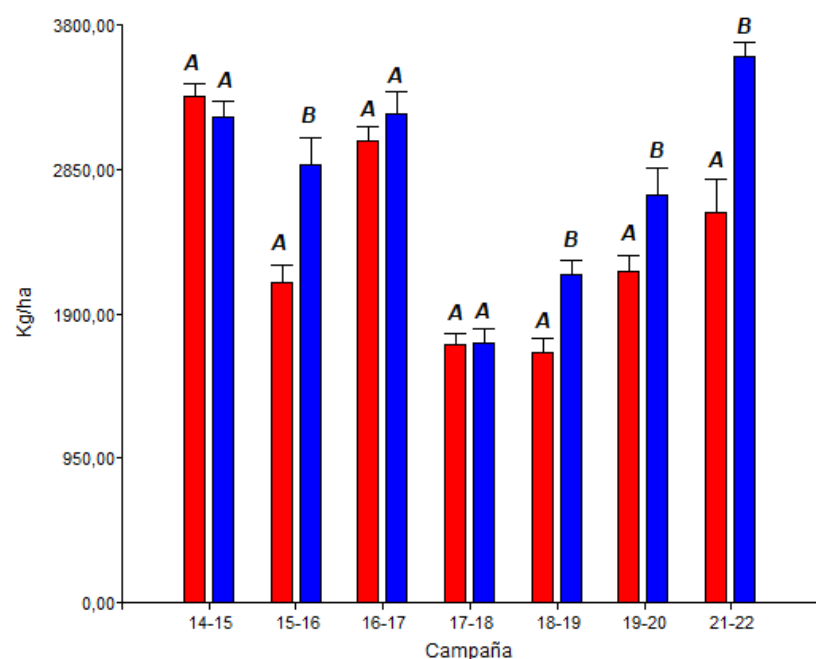


Figura 9: Rendimientos promedio de soja de segunda (Sj2) en cada campaña diferenciando por sistema de producción. Los colores indican distintos tratamientos. (Rojo: AFM, Azul: SIM). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

El modelo SIM logró rendimientos promedios significativamente superiores respecto a AFM (*Tabla 13*; $p>0.05$). Al comparar los modelos dentro de cada campaña el SIM obtuvo mejores rendimientos en dos campañas en Sj1 y en cuatro campañas en Sj2. En ningún caso el modelo AFM fue superior en términos de rendimiento (*Figura 9*).

Que hubiera o no un efecto significativo del modelo SIM en cada campaña fue indiferente a las precipitaciones, temperaturas y radiación durante el período crítico, así como a los rendimientos promedio de la campaña.

4.1.3. Rendimiento y cultivo de cobertura

Se realizó un análisis del rendimiento en soja de primera (Sj1) considerando el uso de cultivos de cobertura (con cultivo de cobertura (CC) y sin cultivo de cobertura (SCC)) en cada campaña y modelo de producción. El efecto de los cultivos de cobertura sobre la soja de segunda (Sj2) no fue considerado en el análisis ya que este cultivo siempre fue precedido por el trigo y previo al trigo no se sembraron cultivos de cobertura estivales.

Tabla 14: Rendimientos promedio de Sj1 con y sin uso de cultivos de cobertura. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Cultivo de cobertura	n	Media	D.E.	CV	
CC	105	3215,45	989,74	30,78	A
SCC	105	3490,35	960,33	27,51	B

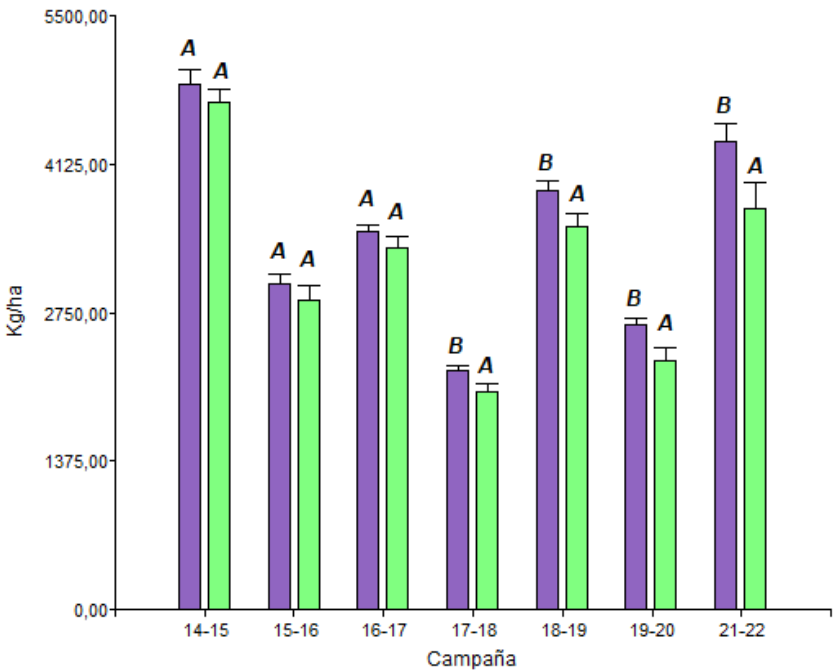


Figura 10: Rendimiento de soja de primera (Sj1) en función de las campañas diferenciando por uso de cultivos de cobertura sobre el rendimiento. Los colores indican diferentes tratamientos. (Violeta: sin cultivo de cobertura (SCC), Verde: con cultivo de cobertura (CC). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Tabla 15: Rendimientos de Sjl con y sin cultivo de cobertura en las parcelas bajo el modelo de producción AFM. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cultivo de cobertura	Medias	n	E.E.	
CC	2995,12	63	113,20	A
SCC	3379,23	63	113,20	B

Tabla 16: Rendimientos de Sjl con y sin cultivo de cobertura en las parcelas bajo el modelo de producción SIM. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Cultivo de cobertura	Medias	n	E.E.	
CC	3545,95	42	159,94	A
SCC	3657,03	42	159,94	A

El uso de cultivos de cobertura en Sjl tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento (**Tabla 14**; $p > 0,05$). Si bien en los primeros tres años no pudo observarse un efecto de este factor sobre el rendimiento, en las últimas cuatro campañas se lograron rendimientos significativamente superiores en aquellas parcelas en las que no se sembraron cultivos de cobertura (**Figura 10**).

Sin embargo, al comparar el efecto del cultivo de cobertura dentro de cada modelo de producción, los menores rendimientos con cultivos de cobertura solo fueron observados en el modelo convencional (AFM; **Tabla 15**), mientras que dentro del modelo sustentable intensificado (SIM; **Tabla 16**) no hubo un efecto sobre el rendimiento.

El efecto del uso de CC sobre el rendimiento no se correlacionó con las precipitaciones durante toda la campaña; sin embargo, sí pudo encontrarse una relación con las lluvias primaverales. Las campañas que presentaron una diferencia significativa entre SCC y CC fueron aquellas con menores lluvias durante los meses de septiembre, octubre y noviembre (**Tabla 17**). Como excepción, la campaña 17-18 presentó abundantes lluvias en este periodo; sin embargo, esta fue la campaña con menores rendimientos y precipitaciones en total por lo que el efecto negativo del CC también podría asociarse al estrés hídrico. Estos resultados coinciden con los hallados por Capurro et. al. (2012), quienes hallaron que en ambientes con abundantes lluvias primaverales no hubo diferencias significativas al incorporar cultivos de cobertura en la rotación mientras que en un ambiente con déficit hídrico primaveral mostró menores rendimientos ante el uso de CC.

Tabla 17: Rendimientos de Sjl en las diferentes campañas. ppt SON: suma de precipitaciones de los meses septiembre, octubre y noviembre; SCC: promedio de rendimientos en parcelas sin cultivo de cobertura; CC: promedio de rendimientos en parcelas con cultivos de cobertura. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre los rendimientos de una misma campaña ($p < 0,05$).

Campaña	ppt SON	SCC		CC	
14-15	337,4	4863,17	a	4697,13	a
15-16	382,2	3009,35	a	2868,93	a
16-17	239,8	3506,87	a	3355,81	a
17-18	259,2	2208,60	b	2017,19	a
18-19	194	3879,54	b	3543,23	a
19-20	72,6	2629,12	b	2309,49	a
21-22	183,1	4335,80	b	3716,38	a

4.1.4. Rendimiento y rotación de cultivos

Tabla 18: Rendimientos promedio de soja de primera (Sj1) en el sistema de producción AFM dentro de cada sistema de rotación de cultivos como promedio de todas las campañas. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Rotación	n	Media	D.E.	CV
S-S	42	2997,04	920,21	30,70 A
M-S	42	3210,94	905,75	28,21 A
T/S-M-S	42	3353,53	906,48	27,03 A

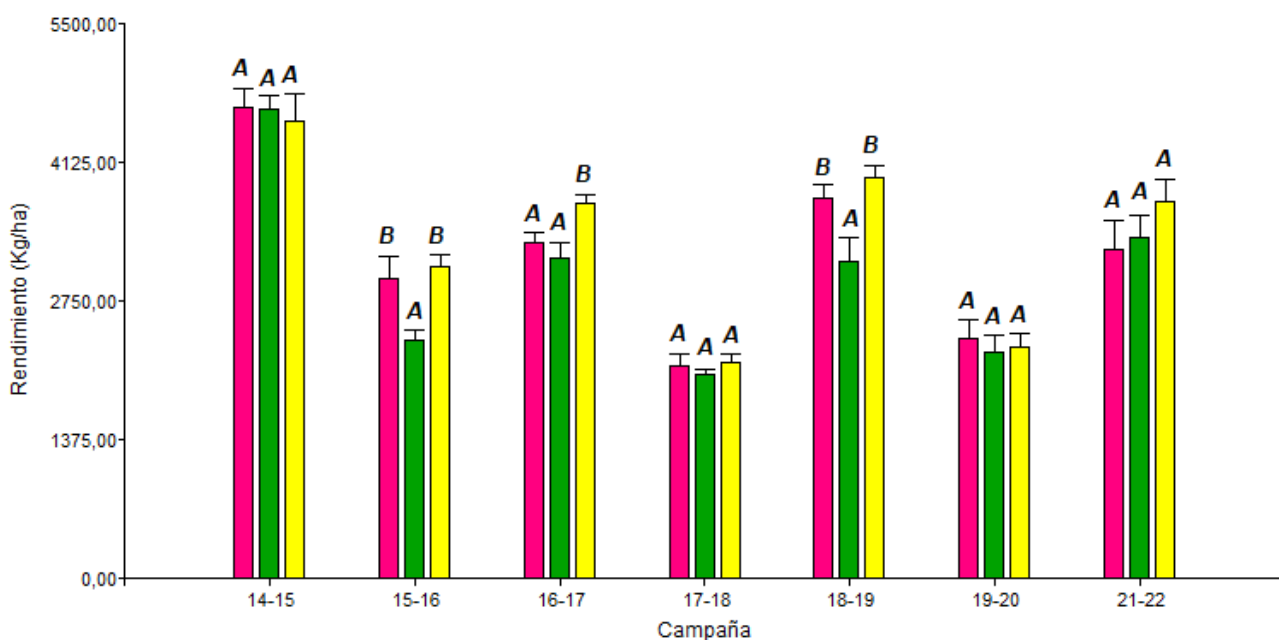


Figura 11: Rendimiento Sj1 AFM en cada campaña en función del sistema de rotación. Los colores indican diferentes rotaciones de cultivos. (Rosa: maíz-soja (M-S); verde: soja-soja (S-S); amarillo: trigo/soja-maíz-soja (T/S-M-S). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

Al tomar los rendimientos promedio de todas las campañas no se observó un efecto del sistema de rotación; sin embargo, al comparar las rotaciones dentro de cada campaña para eliminar el efecto ambiental se encontraron diferencias significativas. En dos de las siete campañas (15-16 y 18-19) el monocultivo de soja presentó rendimientos significativamente menores a las otras dos rotaciones. En la campaña 16-17 la rotación Mz-Sj-Tr/Sj fue superior al resto de las rotaciones. El monocultivo de soja nunca fue significativamente superior a ninguna de las otras rotaciones.

Mayores rendimientos de la soja implantada luego de una gramínea de verano en comparación al monocultivo de soja ya han sido demostrados en numerosos estudios previos (Ferrari, 2010). En un ensayo de larga duración llevado a cabo en la EEA-INTA Marcos Juárez, la siembra de soja luego de sorgo y maíz logró un incremento en el rendimiento promedio de 5 campañas de hasta 18% y 8%, respectivamente (Lattanzi, 2005). En forma consistente con estos resultados, Bellaloui et. Al. (2010) hallaron

incrementos significativos en el rendimiento de la soja en diferentes sistemas de rotación que incluían maíz en comparación a la producida bajo un sistema de monocultivo.

Por último, se compararon los rendimientos entre los 10 diferentes tratamientos aplicados en Sjl y los 4 tratamientos en Sj2. Los resultados se resumen en las **Figuras 12 y 13**.

A pesar de que, al analizar todas las campañas en conjunto, se habían encontrado efectos del modelo y uso de cultivos de cobertura sobre los rendimientos; al evaluar el efecto de los tratamientos no se encontraron diferencias significativas entre parejas de tratamientos que solo difirieran en un factor. Por ejemplo, el tratamiento 7 y 8 solo diferían en el modelo de producción y los rendimientos de Sjl entre ambos no fueron significativamente diferentes. La única excepción fue entre los tratamientos 9 y 10 en Sj2, los cuales solo diferían en el modelo de producción.

Estos resultados podrían indicar que existe un efecto acumulativo entre la rotación, el modelo de producción y el uso de cultivos de cobertura sobre los rendimientos.

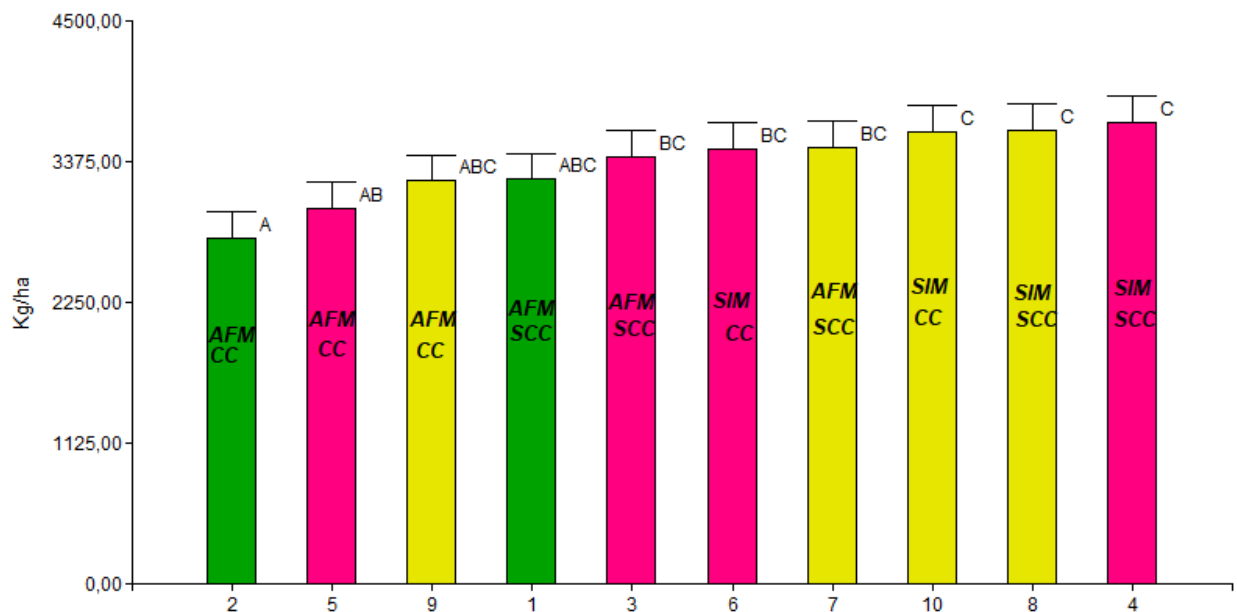


Figura 12: Rendimientos promedio de los tratamientos en Sjl. Los colores indican diferentes rotaciones de cultivo (verde: Sj-Sj; rosa: Mz-Sj; amarillo: Tr/Sj-Mz.Sj). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

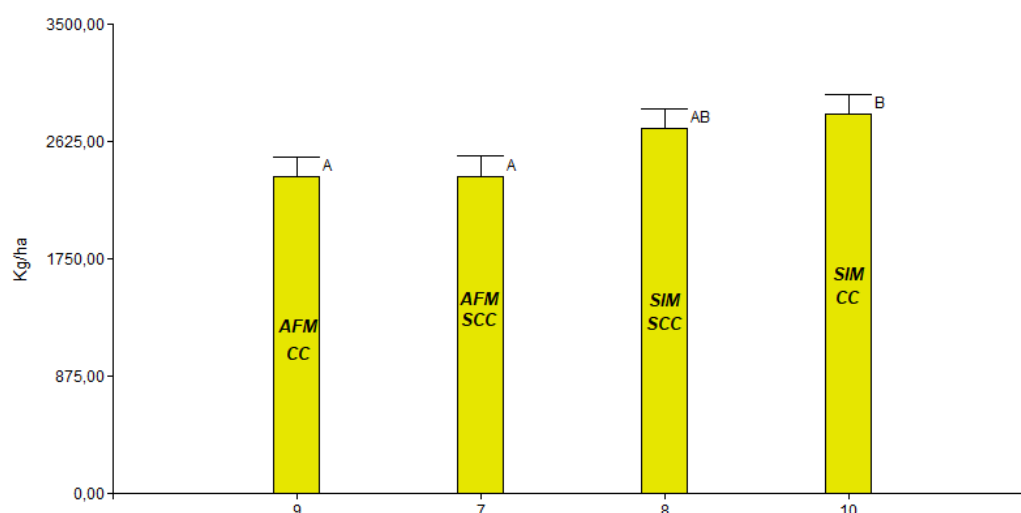


Figura 13: Rendimientos promedio de los tratamientos en S_j2 combinando sistemas de producción (AFM y SIM) y cultivo de cobertura (SCC y CC). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

4.2. Concentración de nutrientes

En la campaña 2017-18 no se analizaron los contenidos de K, Ca ni Mg en los granos. Además, luego de un análisis subjetivo de los datos mediante la elaboración de gráficos ([Anexo II](#)), se encontraron valores atípicos en P y S. Es por ello que se decidió no incluir esta campaña en el análisis de la concentración de nutrientes.

Tabla 19: Concentración de nutrientes en granos de soja de primera como promedio de las seis campañas analizadas. N (nitrógeno); P (fosforo); S (azufre); Mg (magnesio); Ca (calcio); K (potasio).

Nutriente	Media	D.E.	CV
N (gr/kg)	52,36	6,11	11,67
P (gr/kg)	4,92	1,08	21,91
S (gr/kg)	2,22	0,56	25,30
Mg (gr/Kg)	2,62	0,29	11,15
Ca (gr/kg)	3,40	0,82	24,06
K (gr/kg)	17,18	4,06	23,64

Tabla 20: Concentración de nutrientes en granos de soja de segunda como promedio de las seis campañas analizadas. N (nitrógeno); P (fosforo); S (azufre); Mg (magnesio); Ca (calcio); K (potasio)

Nutriente	Media	D.E.	CV
N (gr/kg)	53,37	5,84	10,94
P (gr/kg)	5,51	0,96	17,36
S (gr/kg)	2,32	0,47	20,06
Mg (gr/Kg)	2,52	0,27	10,58
Ca (gr/kg)	3,10	0,96	30,78
K (gr/kg)	17,08	4,38	25,66

Los coeficientes de variación (CV) indican alta variabilidad en la concentración de nutrientes en los granos. Los mayores CV se observaron en Ca, K y S. También se encontró diferencias con los datos publicados por el IPNI (mencionados en la introducción de este trabajo).

Tabla 21: Concentración de nutrientes en granos de soja a cosecha. Sj1: valores promedios encontrados en soja de primera; Sj2: valores promedios encontrados en soja de segunda; IPNI: promedio entre las publicaciones del IPNI del 2002 y 2007. Medias con una letra común no son significativamente diferentes entre Sj1 y Sj2 ($p>0,05$).

	Sj 1	Sj 2	IPNI
N (gr/Kg)	52,36 a	53,37 a	57,5
P (gr/Kg)	4,92 a	5,51 b	6,36
S (gr/Kg)	2,22 a	2,32 a	3,845
Mg (gr/Kg)	2,62 b	2,52 a	3,35
Ca (gr/Kg)	3,4 a	3,1 b	3,02
K (gr/Kg)	17,18 a	17,08 a	19,235

Tabla 22: Concentración de minerales promedio de Sj1 y Sj2 para cada campaña del estudio. Medias con una letra común no son significativamente diferentes entre campañas ($p>0,05$).

	N (gr/Kg)	P (gr/Kg)	S (gr/Kg)	Mg (gr/Kg)	Ca (gr/Kg)	K (gr/Kg)
14-15	52,99 b	4,64 b	2,33 c	2,47 b	3,58 d	12,86 a
15-16	56,3 c	5,23 c	2,69 d	2,61 c	4,21 e	14,24 b
16-17	58,99 d	5,08 c	2,56 d	2,87 e	3,32 c	19,67 de
18-19	52,84 b	5,96 d	2,06 b	2,62 c	2,68 b	19,18 d
19-20	42,12 a	5,96 d	2,24 c	2,74 d	3,71 d	20,92 e
21-22	52,65 b	3,64 a	1,63 a	2,23 a	2,38 a	16,04 c

Al realizar el análisis de la varianza se encontró un efecto significativo de las campañas sobre todas las variables respuesta ($p<0,05$). Es por esto que los datos fueron analizados particionándolos por campañas para eliminar dicho efecto.

4.2.1. Concentración de nutrientes y variables climáticas

Para analizar el efecto ambiental sobre la calidad de los granos, se observó la correlación y regresión lineal entre la concentración de los diferentes minerales en los granos con diferentes variables climáticas. Para ello se calculó el coeficiente de Pearson junto a su nivel de significación y el coeficiente de determinación.

Ninguno de los minerales en grano mostró una relación consistente con las variables climáticas analizadas.

Tabla 23: Coeficientes de determinación (R^2) y correlación (Pearson) entre variables climáticas y la concentración de minerales en granos de Sjl y Sj2.

Mineral (1)	Clima (2)	n	R^2	Pearson	p-valor
N (gr/kg)	Ppt p.c.	252	0,002	0,05	0,4636
N (gr/kg)	Temp p.c.	252	0,01	-0,07	0,2426
N (gr/kg)	Rad p.c.	252	0,08	-0,29	<0,0001
P (gr/kg)	Ppt p.c.	252	0,09	-0,31	<0,0001
P (gr/kg)	Temp p.c.	252	0,004	-0,07	0,2983
P (gr/kg)	Rad p.c.	252	0,03	-0,18	0,0101
S (gr/kg)	Ppt p.c.	252	0,02	-0,15	0,0191
S (gr/kg)	Temp p.c.	252	0,05	0,22	0,0004
S (gr/kg)	Rad p.c.	252	0,01	-0,10	0,1543
Mg (gr/Kg)	Ppt p.c.	252	0,01	0,10	0,0986
Mg (gr/Kg)	Temp p.c.	252	0,1	0,31	<0,0001
Mg (gr/Kg)	Rad p.c.	252	0,0001	-0,01	0,8885
Ca (gr/kg)	Ppt p.c.	252	0,01	0,07	0,2465
Ca (gr/kg)	Temp p.c.	252	0,23	0,48	<0,0001
Ca (gr/kg)	Rad p.c.	252	0,03	0,17	0,0130
K (gr/kg)	Ppt p.c.	252	0,003	0,05	0,4239
K (gr/kg)	Temp p.c.	252	0,002	-0,05	0,4638
K (gr/kg)	Rad p.c.	252	0,003	-0,05	0,4357

- Ppt p.c.: suma de precipitaciones durante el período crítico del cultivo
- Temp p.c.: temperatura promedio durante el período crítico del cultivo
- Rad p.c.: radiación sola promedio durante el período crítico del cultivo

Como período crítico se consideraron los meses enero, febrero y marzo para Sjl y febrero, marzo y abril para Sj2.

4.2.2. Concentración de nutrientes y modelos de producción

Tabla 24: Concentración de minerales en granos de Sjl a cosecha en cada modelo de producción (AFM y SIM). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

	14-15		15-16		16-17		18-19		19-20		21-22	
N (gr/Kg)	AFM	50,57 a	AFM	55,91 a	AFM	58,16 a	AFM	53,57 a	AFM	40,79 a	AFM	50,95 a
	SIM	53,57 b	SIM	56,67 a	SIM	60,95 b	SIM	53,18 a	SIM	42,34 a	SIM	53,51 b
P (gr/Kg)	AFM	4,43 a	AFM	5,18 a	AFM	4,53 a	AFM	5,73 a	AFM	5,81 a	AFM	3,25 a
	SIM	4,58 a	SIM	5,20 a	SIM	5,47 b	SIM	5,79 a	SIM	6,00 a	SIM	3,26 a
S (gr/Kg)	AFM	2,28 a	AFM	2,74 a	AFM	2,50 a	AFM	1,88 a	AFM	1,92 a	AFM	1,38 a
	SIM	2,42 a	SIM	3,02 a	SIM	2,53 a	SIM	2,28 b	SIM	2,56 b	SIM	1,74 b
Mg (gr/Kg)	AFM	2,45 a	AFM	2,64 a	AFM	2,85 a	AFM	2,89 a	AFM	2,91 a	AFM	2,22 b
	SIM	2,43 a	SIM	2,60 a	SIM	2,82 a	SIM	2,73 a	SIM	2,61 a	SIM	2,18 a
Ca (gr/Kg)	AFM	3,80 a	AFM	4,19 a	AFM	3,41 a	AFM	3,09 b	AFM	4,00 a	AFM	2,63 b
	SIM	3,46 a	SIM	4,24 a	SIM	3,25 a	SIM	2,62 a	SIM	3,58 a	SIM	2,49 a
K (gr/Kg)	AFM	13,21 a	AFM	13,91 a	AFM	19,58 a	AFM	19,96 a	AFM	23,04 a	AFM	15,09 a
	SIM	13,23 a	SIM	14,64 b	SIM	20,04 a	SIM	19,80 a	SIM	20,38 a	SIM	15,02 a

Tabla 25: Concentración de minerales en granos de S_j2 a cosecha en cada modelo de producción (AFM y SIM). Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

	14-15		15-16		16-17		18-19		19-20		21-22	
N (gr/Kg)	AFM	53,41 a	AFM	56,89 a	AFM	60,82 b	AFM	52,14 a	AFM	42,37 a	AFM	53,62 a
	SIM	55,41 a	SIM	56,82 a	SIM	57,12 a	SIM	53,2 a	SIM	43,59 a	SIM	55,02 a
P (gr/Kg)	AFM	4,47 a	AFM	5,05 a	AFM	5,44 a	AFM	6,46 a	AFM	6,2 a	AFM	4,67 a
	SIM	5,15 a	SIM	5,42 a	SIM	5,56 a	SIM	6,67 a	SIM	6,45 a	SIM	4,55 a
S (gr/Kg)	AFM	2,53 a	AFM	2,23 a	AFM	2,7 a	AFM	1,84 a	AFM	1,92 a	AFM	1,7 a
	SIM	2,33 a	SIM	2,56 a	SIM	2,54 a	SIM	2,53 b	SIM	2,93 b	SIM	2,07 b
Mg (gr/Kg)	AFM	2,5 a	AFM	2,66 b	AFM	2,9 a	AFM	2,15 a	AFM	2,78 a	AFM	2,28 a
	SIM	2,48 a	SIM	2,58 a	SIM	2,79 a	SIM	2,25 a	SIM	2,68 a	SIM	2,23 a
Ca (gr/Kg)	AFM	3,81 a	AFM	4,15 a	AFM	3,45 a	AFM	2,27 a	AFM	3,79 a	AFM	1,95 a
	SIM	3,41 a	SIM	3,91 a	SIM	2,99 a	SIM	2,24 a	SIM	3,43 a	SIM	1,83 a
K (gr/Kg)	AFM	11,88 a	AFM	14,25 a	AFM	19,92 a	AFM	17,57 a	AFM	17,28 a	AFM	18,37 a
	SIM	12,5 a	SIM	14,71 a	SIM	19,55 a	SIM	18,02 a	SIM	22,44 a	SIM	18,43 a

Para la confección de la tabla de S_j1 (**Tabla 24**) no se incluyeron los datos de las parcelas con rotación S_j-S_j para eliminar posibles efectos del sistema de rotación sobre las variables estudiadas ya que esta rotación no solo fue empleada bajo el modelo AFM.

Con excepción del nitrógeno, no se hallaron efectos contradictorios del modelo entre S_j1 y S_j2.

En S_j1 el modelo SIM tuvo un efecto positivo sobre los niveles de N en los granos en tres de las seis campañas; esto coincide con los resultados obtenidos por Daverede et al (2019) en los que mayores dosis de P y S mostraron mayores niveles de proteína en los granos.

La adición de P al suelo usualmente ocasiona un incremento en las concentraciones de N en los tejidos de las leguminosas y esto “podría ser consecuencia de una mejor nodulación, de una vida más larga de los nódulos y de una simbiosis más eficiente” (Andrew, 1976; Wong Chang, 1992).

Pahuara Hernandez, D. y Zúñiga Dávila, D. (2002) estudiaron el efecto de la aplicación de 80Kg/ha de P₂O₅ (Superfosfato Triple) sobre pasturas de Rye-grass y trébol en las poblaciones microbianas del suelo. En dicho tratamiento se presentaron mayores poblaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre (Azotobacter) y simbióticas (Rhizobium) en comparación al tratamiento sin fertilización fosforada.

En S_j2 el modelo AFM (**Tabla 25**) presentó un efecto positivo sobre el contenido de nitrógeno, sin embargo, esto ocurrió únicamente en una campaña con lo cual el efecto podría considerarse no consistente.

A pesar de que trabajos previos han demostrado una alta correlación entre el contenido de P en granos de soja con la dosis de P aplicadas al suelo (Soliman y Farah, 1985) las concentraciones de P en los granos bajo el modelo SIM solo fueron significativamente mayores en una campaña en S_j1. Estos resultados son similares a los hallados por Krueger et. Al (2013) en un estudio llevado a cabo junto a la Universidad Estatal de Iowa. En dicho estudio se observaron incrementos en las concentraciones de P y K en respuesta a

la fertilización con P, pero estas diferencias no fueron significativas entre diferentes dosis de P aplicado (28 y 56 Kg de P/ha).

Con respecto al potasio, el aumento en las dosis de P aplicada tampoco tuvo un efecto importante en el presente estudio. El modelo SIM, con mayores dosis de P, solo presentó concentraciones de K significativamente mayores en un caso.

Las concentraciones de Mg tampoco variaron de manera consistente entre modelos habiéndose hallado un efecto positivo del modelo AFM únicamente en una campaña dentro de Sj1.

El efecto más consistente del modelo de producción fue sobre el azufre. Este nutriente mostró niveles significativamente mayores bajo el modelo SIM en las campañas 18/19, 19/20 y 21/22; tanto para Sj1 como para Sj2. Estos resultados podrían deberse a las mayores dosis de este mineral aplicadas a la siembra en el modelo sustentable intensificado.

Las concentraciones de calcio en Sj1 en el modelo AFM fueron mayores en dos campañas, a pesar de que las dosis de este mineral aportadas con las fertilizaciones fueron mayores en el modelo SIM. Se sugiere que este efecto es independiente a la disponibilidad de calcio en el suelo ya que incluso el valor más bajo de calcio en el suelo registrado durante los años del experimento superó ampliamente los requerimientos de calcio del cultivo (16 Kg/tn) (INPOFOS; 2002). ([Anexo III](#))

4.2.3. Concentración de nutrientes y cultivo de cobertura

Tabla 26: Concentración de minerales en granos de soja de primera a cosecha con (CC) y sin (SCC) cultivos de cobertura. Letras iguales no son significativamente diferentes ($p>0,05$).

		14-15		15-16		16-17		18-19		19-20		21-22
N (gr/Kg)	SCC	51,17 a	No	56,17 a	No	59,46 a	No	53,73 a	No	41,68 a	No	52,75 a
	CC	53,68 b	Si	55,99 a	Si	58,55 a	Si	52,09 a	Si	41,87 a	Si	51,23 a
P (gr/Kg)	SCC	4,58 a	No	5,37 a	No	5,13 a	No	5,73 a	No	5,22 a	No	3,19 a
	CC	4,57 a	Si	5,08 a	Si	4,71 a	Si	5,71 a	Si	6,41 b	Si	3,31 b
S (gr/Kg)	SCC	2,26 a	No	2,87 a	No	2,61 a	No	2,05 a	No	2,39 b	No	1,57 a
	CC	2,31 a	Si	2,74 a	Si	2,45 a	Si	1,98 a	Si	1,96 a	Si	1,49 a
Mg (gr/Kg)	SCC	2,46 a	No	2,63 a	No	2,92 a	No	2,78 a	No	2,7 a	No	2,21 a
	CC	2,47 a	Si	2,58 a	Si	2,84 a	Si	2,81 a	Si	2,78 a	Si	2,22 a
Ca (gr/Kg)	SCC	3,53 a	No	4,19 a	No	3,29 a	No	2,86 a	No	3,51 a	No	2,6 a
	CC	3,61 a	Si	4,37 a	Si	3,42 a	Si	2,85 a	Si	3,97 a	Si	2,56 a
K (gr/Kg)	SCC	12,98 a	No	14,17 a	No	20,16 a	No	19,74 a	No	21,98 a	No	14,94 a
	CC	13,28 a	Si	14,12 a	Si	19,14 a	Si	19,72 a	Si	20,71 a	Si	15,24 a

Al igual que para el caso del rendimiento, no se consideró el efecto de los cultivos de cobertura sobre la calidad de los granos de Sj2.

El uso de cultivos de cobertura no tuvo un efecto significativo sobre la concentración de ninguno de los minerales en los granos a cosecha al analizar todas las campañas en conjunto. ([Anexo I](#))

Al analizar el factor “cultivo de cobertura” dentro de cada campaña (**Tabla 26**), el uso de cultivos de servicio tuvo un efecto positivo sobre la concentración de N en una campaña y de P en dos campañas. Por su parte, la ausencia de cultivos de cobertura (SCC) tuvo un efecto negativo sobre el contenido de azufre en una campaña. Estos efectos no resultan consistentes y coinciden con los resultados hallados por Carver et. Al. (2017) quienes no encontraron un efecto significativo del uso de cultivos de cobertura, previo a la siembra de soja, al calcular la extracción de N, P y K (lb/a) en los granos de este cultivo.

4.2.4. Concentración de nutrientes y rotación de cultivos

Para el análisis del efecto de las rotaciones de cultivos sobre la concentración de minerales en los granos se excluyó el modelo SIM ya que la rotación Sj-Sj no fue empleada bajo este modelo.

La rotación de cultivos no tuvo un efecto sobre el contenido de ninguno de los minerales y en ninguna de las campañas. En los gráficos presentados en el [Anexo IV \(Figuras 10 a 15\)](#) se puede observar que la concentración de los diferentes nutrientes varía a lo largo de los años que duró el ensayo, pero estos patrones son similares entre sistemas de rotación.

Estos resultados difieren con los publicados en 2010 por Bellaoui et. al. En un ensayo en Carolina del Norte, Bellaoui et. al. hallaron que, luego de tres años de rotación con maíz, la concentración de fósforo y otros nutrientes en los granos a cosecha eran mayores en comparación a los granos producidos bajo el monocultivo de soja.

4.2.5. Correlación entre nutrientes

La correlación entre las concentraciones de los seis nutrientes analizados fue evaluada calculando los coeficientes de Pearson entre las 15 combinaciones posibles de nutrientes. Estos coeficientes fueron calculados separando Sj1 y Sj2 y para cada campaña de manera independiente para observar si las correlaciones eran consistentes entre campañas y cultivos. En la **Tabla 27** se muestran únicamente los coeficientes de Pearson que resultaron estadísticamente significativos ($p < 0,05$).

La única correlación consistente fue entre el calcio y el magnesio, los cuales estuvieron alta y positivamente correlacionados en 5 casos. Estos resultados son similares a los publicados por Marioli Nobile C. G. (2016), quien encontró un coeficiente de correlación de Pearson de 0,87 ($p < 0,0001$) entre Mg y Ca en los granos de soja.

Tabla 27: Coeficientes de correlación de Pearson entre minerales en el grano de soja.

	N (gr/kg)	P (gr/kg)	S (gr/kg)	Mg (gr/Kg)	Ca (gr/kg)	K (gr/kg)
N (gr/kg)	1,00					
P (gr/kg)	0,75 0,64	1,00				
S (gr/kg)	0,40 0,63	-0,38	1,00			
Mg (gr/Kg)	0,75 -0,60	-	-0,48 0,77	1,00		
				0,84		
			0,39	0,81		
Ca (gr/kg)	0,79	-	-0,37 0,46	0,55 0,87 0,64	1,00	
		0,51		0,63	0,48	
K (gr/kg)	0,76	0,69 -0,70	-	-0,77	-0,52 -0,87	1,00

4.2.6. Concentración de nutrientes y rendimiento

Se realizaron análisis de regresión para evaluar los niveles de extracción por superficie de los diferentes minerales (Kg/ha) en función del rendimiento (Kg/ha). Los valores de minerales por hectárea extraídos fueron calculados multiplicando el rendimiento de los granos (Kg/ha) por la concentración de minerales en los mismos (gr/Kg). Para este análisis se emplearon los datos de la soja de primera y de segunda conjuntamente.

En las **Figuras 16 a 21** se muestran los gráficos de regresión lineal con sus respectivas funciones de regresión y coeficientes de determinación. A mayor coeficiente de determinación hay una menor dispersión de los valores de concentración de nutrientes en grano, la mayor dispersión observada en rendimientos altos se debe simplemente a que es multiplicada por un valor mayor.

También fueron calculados los coeficientes de determinación entre el rendimiento (Kg/ha) y la concentración de minerales en los granos (gr/Kg). Estos se encuentran expresados en la **Tabla 28**. Se pudo observar que la concentración de los diferentes minerales no pudo ser explicada por el rendimiento de la soja. Esto explica el buen ajuste (R^2) entre el rendimiento y la extracción de minerales por hectárea ya que esta última variable estuvo principalmente determinada por los kilos cosechados.

Tabla 28: coeficiente de determinación (R^2) entre el rendimiento de la soja (Kg/ha) y la concentración de los diferentes nutrientes en los granos a cosecha (gr/Kg).

Variable	N	R^2
N (gr/kg)	252	0,06
P (gr/kg)	252	0,20
S (gr/kg)	252	0,004
Mg (gr/Kg)	252	0,03
Ca (gr/kg)	252	0,02
K (gr/kg)	252	0,05

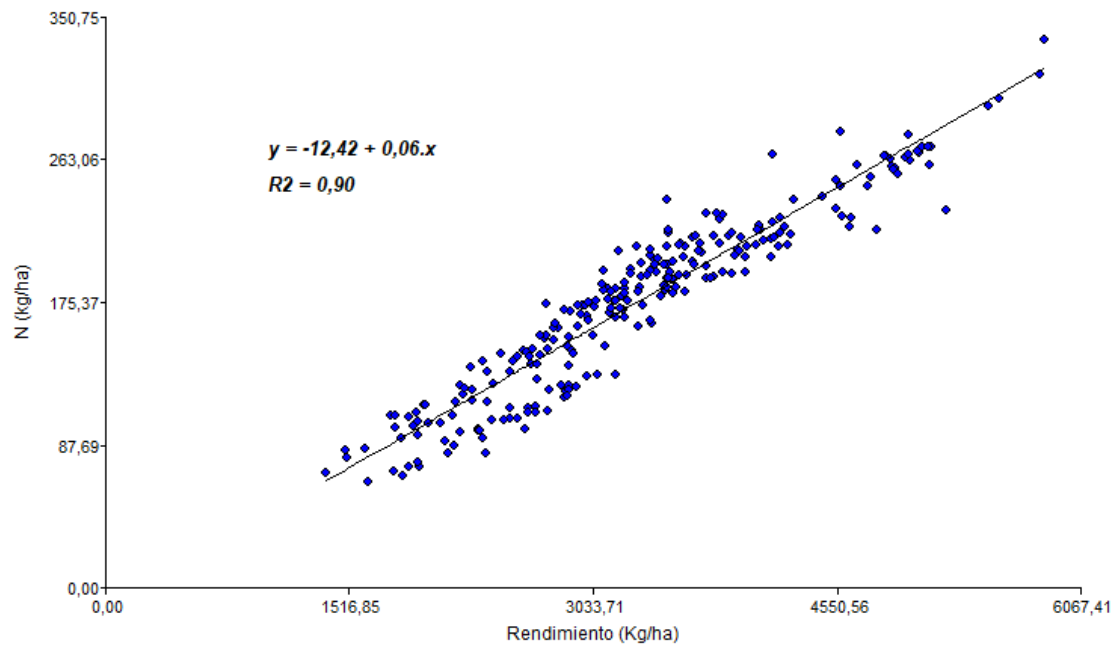


Figura 14: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de N en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

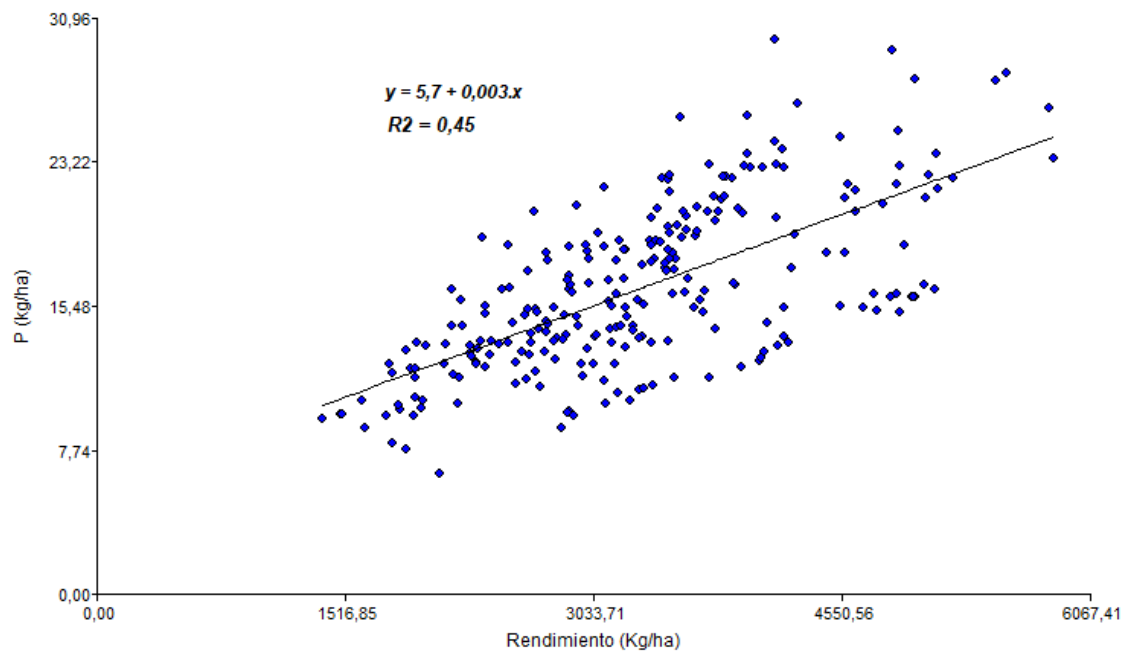


Figura 15: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de P en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

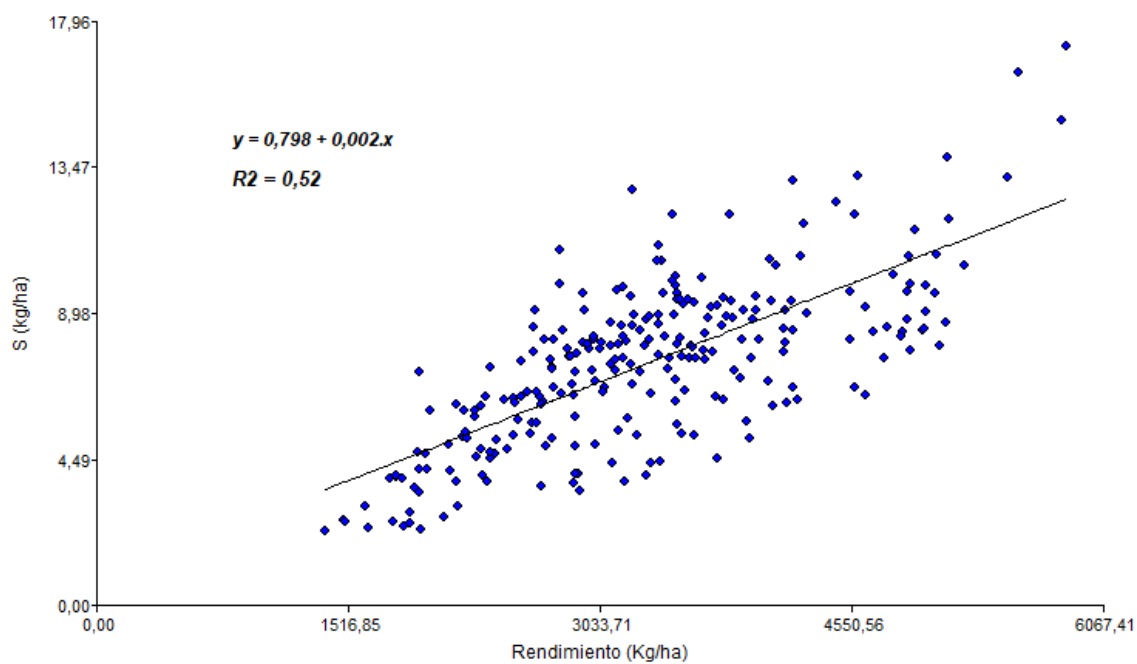


Figura 16: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de S en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

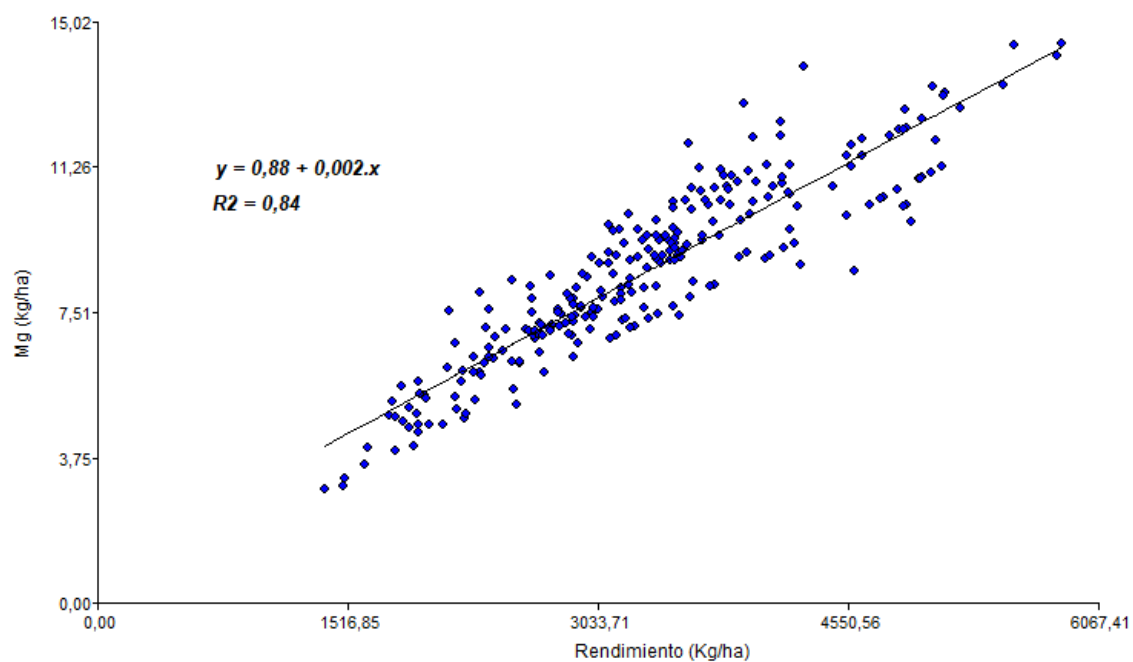


Figura 17: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de Mg en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

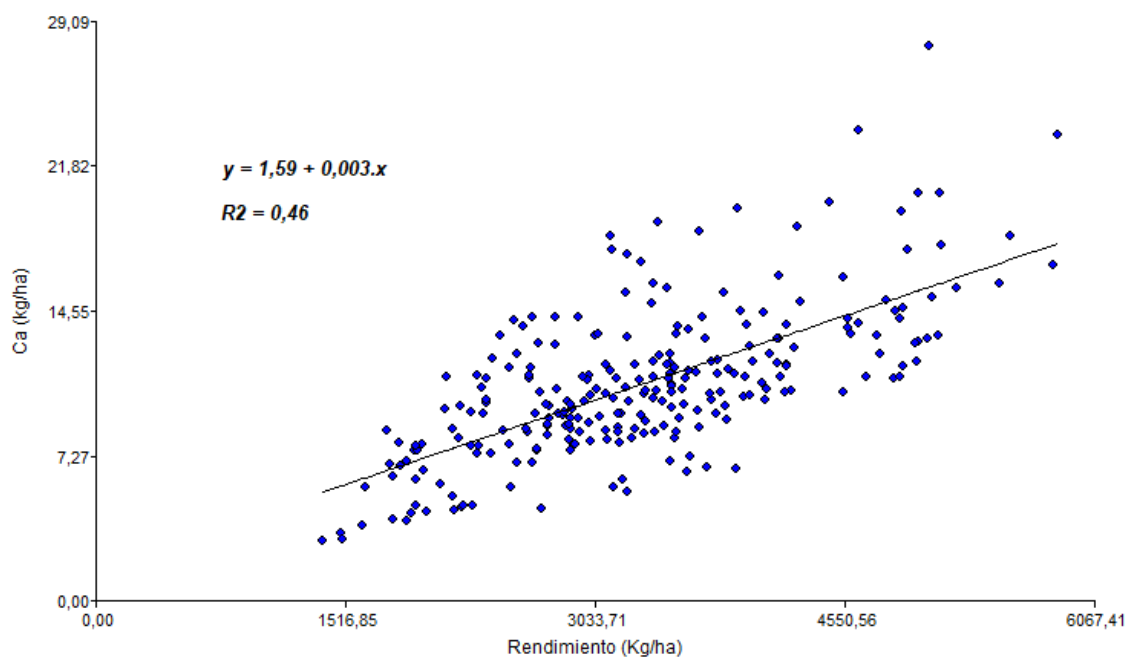


Figura 18: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de Ca en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

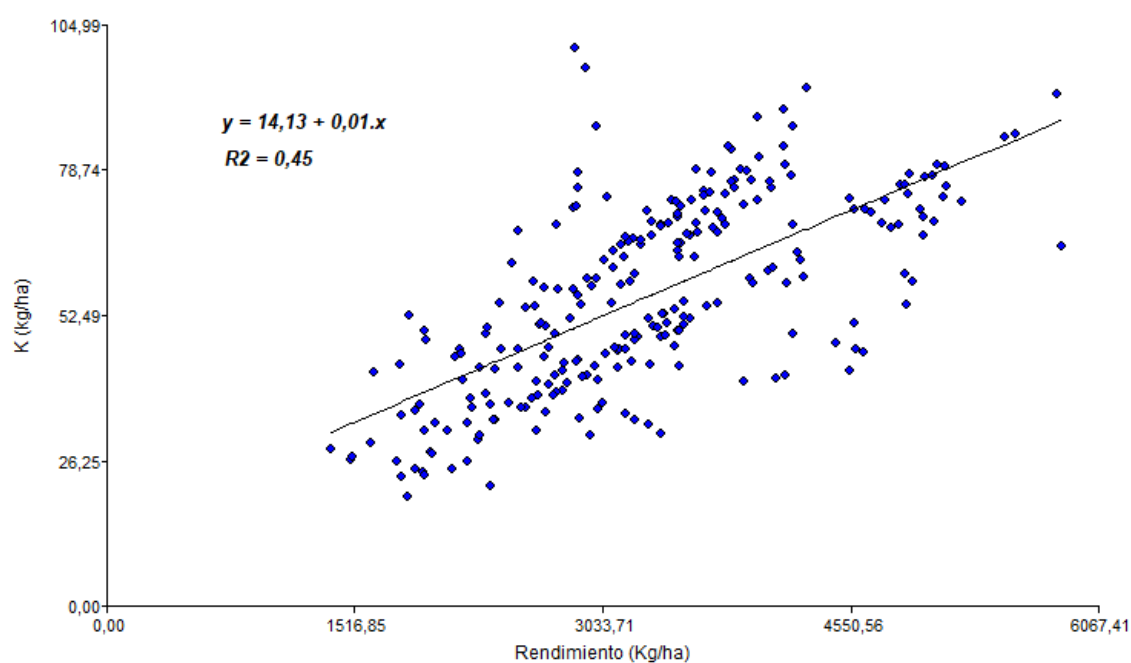


Figura 19: Regresión lineal entre el rendimiento y la concentración de K en granos de soja (Sj1 y Sj2) a cosecha

Las altas correlaciones observadas pueden ser explicadas debido a que, a mayores kilos de granos cosechados, mayor cantidad de nutrientes se extraen del sistema con dicha cosecha.

5. Conclusiones

Cuando se compararon los rendimientos y la concentración de nutrientes entre campañas se observaron diferencias significativas entre estas. Sin embargo, no se hallaron correlaciones entre las variables estudiadas y diferentes factores climáticos que explicaran estas variaciones entre campañas.

Con los resultados obtenidos se acepta la primera hipótesis planteada en este trabajo, ya que, a través de un modelo de producción sustentable e intensificada se lograron mayores rendimientos en el cultivo de soja. Sin embargo, las diferencias entre este modelo con las técnicas agronómicas promedio de la zona no fueron significativas en todas las campañas. El análisis de las condiciones ambientales en las cuales el efecto positivo del modelo SIM puede expresarse escapa al alcance de este trabajo.

Por otro lado, los efectos observados del modelo SIM desaparecieron al comparar entre lotes con igual rotación y cultivo de servicio. Se puede concluir que para lograr mayores rendimientos no es suficiente con realizar mayores inversiones en variedades genéticas y dosis de fertilizantes sino en tener una mirada integral del sistema considerando secuencias de cultivos y estado de los lotes.

El uso de cultivos de cobertura, antecesores a la soja, puede deprimir el rendimiento de la misma, en particular en aquellos años con escasas precipitaciones primaverales. No obstante, al utilizar el modelo SIM el efecto negativo del cultivo cobertura desapareció, lo cual indica que la técnica del uso de cultivos de servicio podría ser compatible con modelos más intensificados.

El detrimento del rendimiento de soja sembrada sobre otro cultivo de soja fue menos contundente que el hallado en previos trabajos; pero el monocultivo de soja nunca supero en rendimiento a ninguna de las otras dos rotaciones e incluso fue significativamente menor a ambas en dos campañas.

Los altos coeficientes de variación observados, así como las diferencias significativas entre campañas indican que existe una alta variabilidad en la concentración de minerales en los granos de soja por lo que, al calcular las extracciones de nutrientes del suelo a través de los granos se debería trabajar con un rango de valores y no con valores determinados.

La segunda hipótesis planteada al inicio del trabajo es rechazada ya que, los mayores aportes de P y Ca realizados en el sistema SIM no fueron reflejados en mayores concentraciones de dichos minerales en los granos. El uso de mayores dosis de fertilizantes, así como germoplasmas de mejor desempeño solo aumentaron de forma consistente las concentraciones de N y S en los granos de soja a cosecha.

No se observaron efectos consistentes del sistema de rotación ni del uso de cultivos de cobertura sobre la concentración de minerales en los granos.

Los únicos minerales que mostraron una correlación significativa y consistente entre campañas fueron el Ca y el Mg, resultado que coincide con publicaciones previas.

Anexo I

Efecto de tecnología y bloque sobre el rendimiento en soja de primera

Crop	Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Soybean	Dry_yield	210	0,05	0,03	28,79	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9776914,60	3	3258971,53	3,50	0,0165
Technology	8651726,31	1	8651726,31	9,28	0,0026
Rep.	1125188,29	2	562594,14	0,60	0,5478
Error	191980990,48	206	931946,56		
Total	201757905,07	209			

Efecto de tecnología y bloque sobre el rendimiento en soja de segunda

Crop	Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Soybean2	Dry_yield	84	0,10	0,07	26,32	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4209314,07	3	1403104,69	3,07	0,0325
Technology	3535930,02	1	3535930,02	7,74	0,0067
Rep.	673384,06	2	336692,03	0,74	0,4819
Error	36560582,98	80	457007,29		
Total	40769897,05	83			

Efecto de la campaña sobre el rendimiento en soja de primera

Crop	Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Soybean	Dry_yield	210	0,76	0,75	14,55	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	153433003,69	6	25572167,28	107,42	<0,0001
Campaign	153433003,69	6	25572167,28	107,42	<0,0001
Error	48324901,38	203	238053,70		
Total	201757905,07	209			

Efecto de la campaña sobre el rendimiento en soja de segunda

Crop	Variable	N	R ²	R ²	Aj	CV
Soybean2	Dry_yield	84	0,67	0,65	16,25	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	27353417,54	6	4558902,92	26,16	<0,0001
Campaign	27353417,54	6	4558902,92	26,16	<0,0001
Error	13416479,51	77	174239,99		
Total	40769897,05	83			

Efecto del uso de cultivos de cobertura sobre la concentración de minerales en granos de soja de primera para todas las campañas en conjunto

N (gr/kg)

Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	N (gr/kg)	180	4,7E-04	0,00	11,70

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,11	1	3,11	0,08	0,7737
Cover crop	3,11	1	3,11	0,08	0,7737
Error	6682,15	178	37,54		
Total	6685,26	179			

P (gr/kg)

Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	P (gr/kg)	180	1,9E-03	0,00	21,95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,39	1	0,39	0,34	0,5629
Cover crop	0,39	1	0,39	0,34	0,5629
Error	207,43	178	1,17		
Total	207,82	179			

S (gr/kg)

Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	S (gr/kg)	180	0,01	0,01	25,18

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,84	1	0,84	2,69	0,1027
Cover crop	0,84	1	0,84	2,69	0,1027
Error	55,76	178	0,31		
Total	56,61	179			

Mg (gr/Kg)

Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	Mg (gr/Kg)	180	1,2E-08	0,00	11,19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,8E-07	1	1,8E-07	2,1E-06	0,9988
Cover crop	1,8E-07	1	1,8E-07	2,1E-06	0,9988
Error	15,24	178	0,09		
Total	15,24	179			

Ca (gr/kg)

Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	Ca (gr/kg)	180	0,01	1,3E-03	24,04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,82	1	0,82	1,23	0,2693
Cover crop	0,82	1	0,82	1,23	0,2693
Error	118,73	178	0,67		
Total	119,55	179			

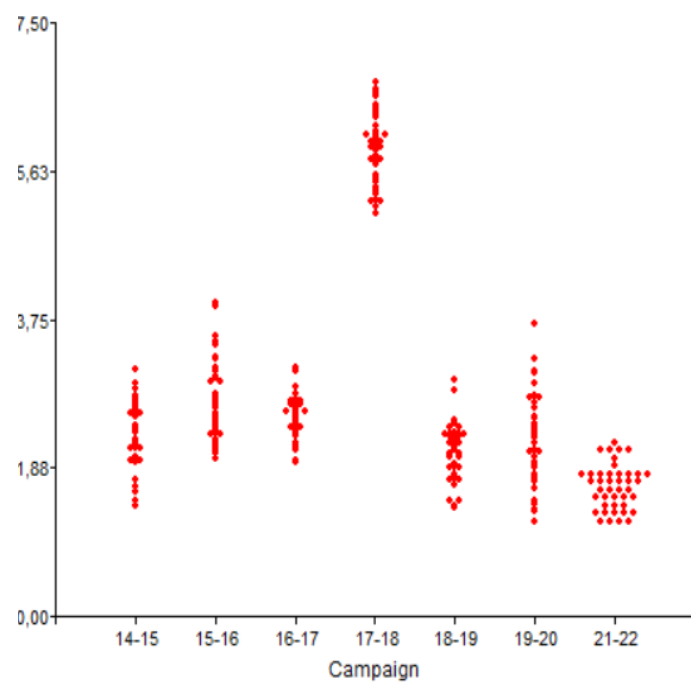
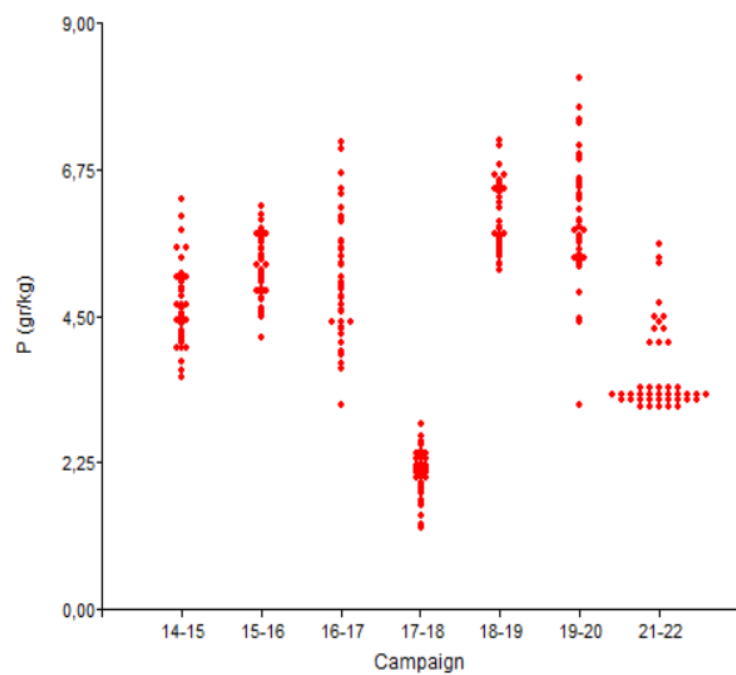
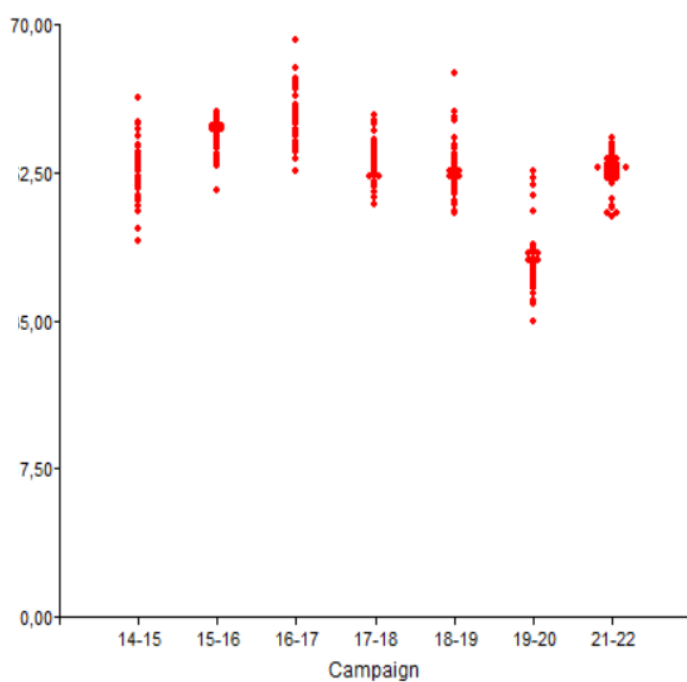
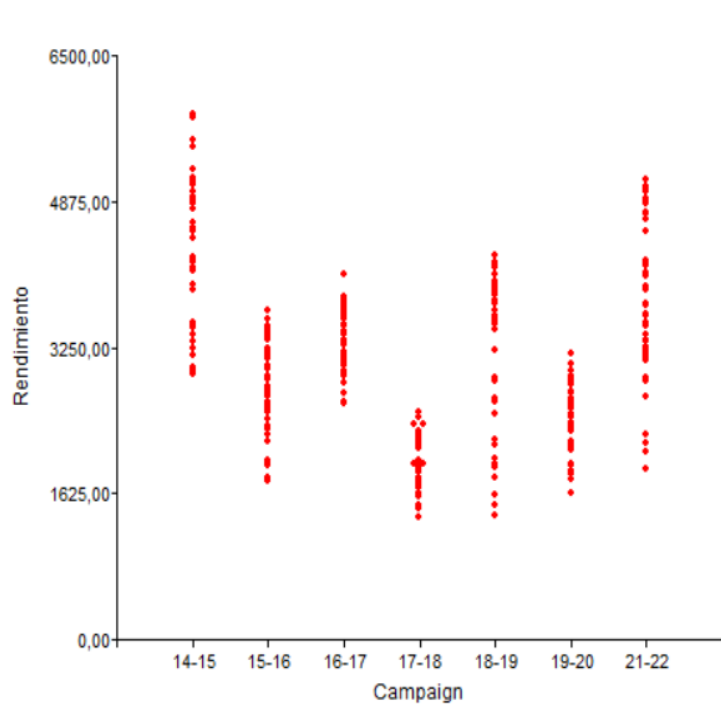
K (gr/kg)

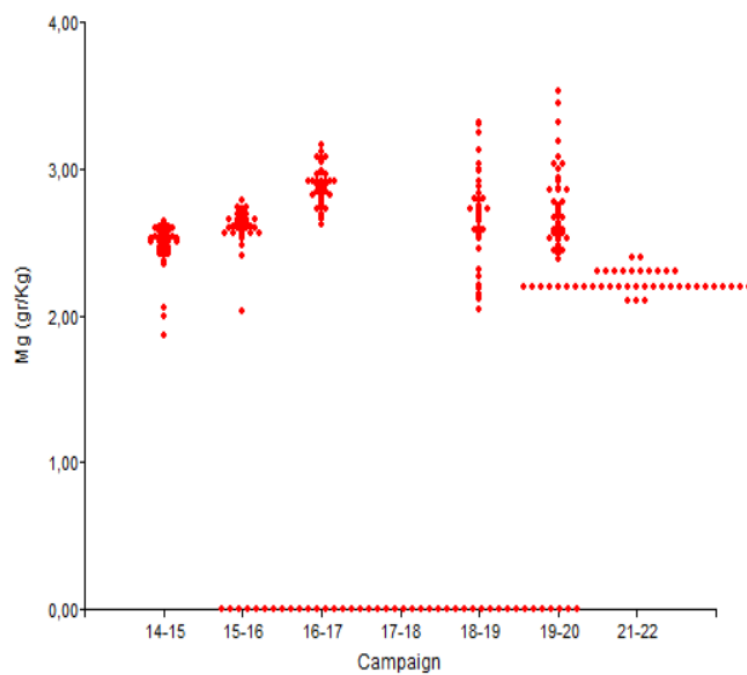
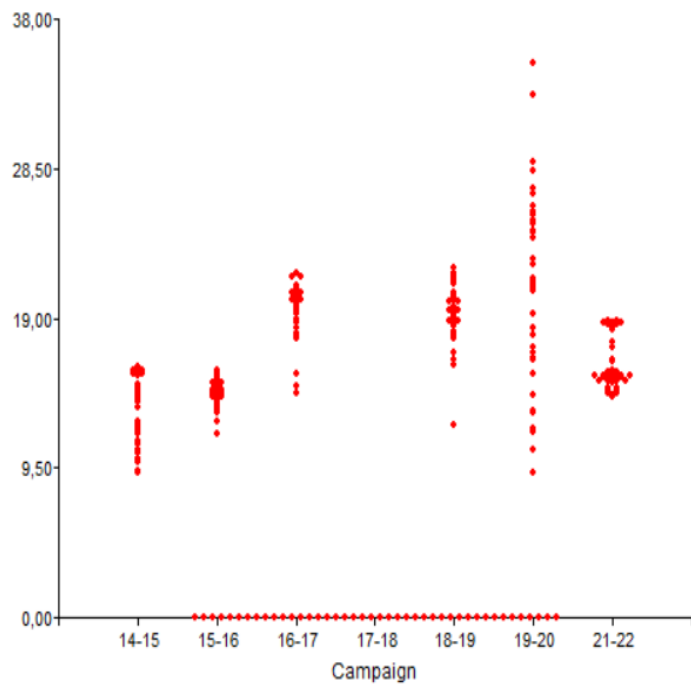
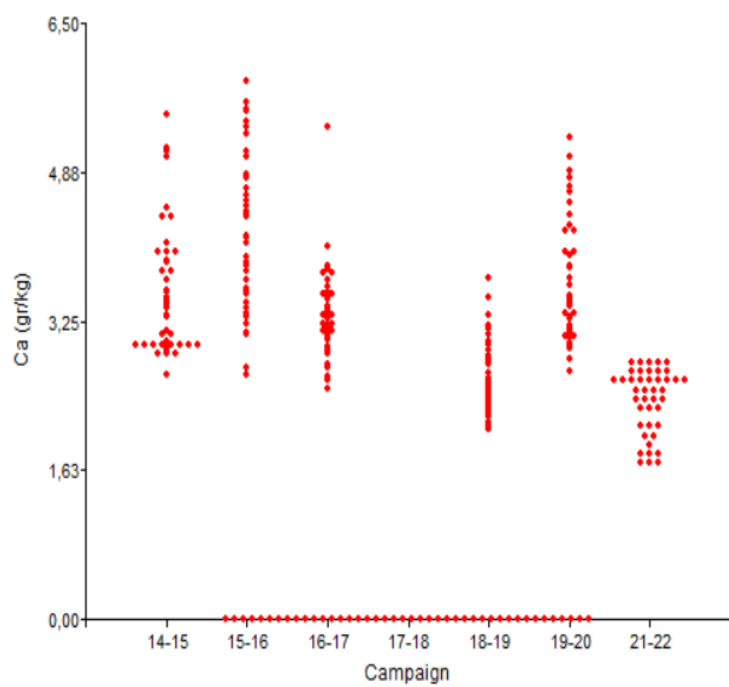
Crop	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Soybean	K (gr/kg)	180	1,3E-03	0,00	23,69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,84	1	3,84	0,23	0,6310
Cover crop	3,84	1	3,84	0,23	0,6310
Error	2949,41	178	16,57		
Total	2953,25	179			

Anexo II: Gráficos de densidad de puntos





Anexo III: Cálculos disponibilidad de calcio

Requerimiento de la soja

- Requerimiento por tonelada de grano: 16 Kg Ca/tn (INPOFOS, 2002)
- Rendimiento: 3tn/ha (valor aproximado)

Requerimiento total: 16 Kg Ca/ha x 3 tn/ha = **48 Kg Ca/ha**

Peso de una hectárea

Densidad del suelo: 2,65gr/cm³ (Conti, M. E., 2000)

1 hectárea: 10.000 m² x 0,2 m= 2.000 m³

2.000 m³ = 2.000.000.000 cm³

2.000.000.000 cm³ x 2,65gr/cm³= 5.300.000.000 gr

5.300.000.000 gr = 5.300.000 Kg = 5.300 tn

1ha= **5.300 tn**

Disponibilidad de calcio

Mínima disponibilidad registrada: 697 ppm (0-20 cm)

1 Kg tierra ----- 697 mg Ca

5.300.000 Kg tierra ----- 3.694.100.000 mg Ca

3.694.100.000 mg Ca = 3.694.100 g Ca = **3.694 Kg Ca**

(disponibilidad) 3.694 Kg Ca/ha > 48 Kg Ca/ha (requerimiento)

Anexo IV: Concentración de minerales en granos de soja por
campaña dentro de cada sistema de rotación

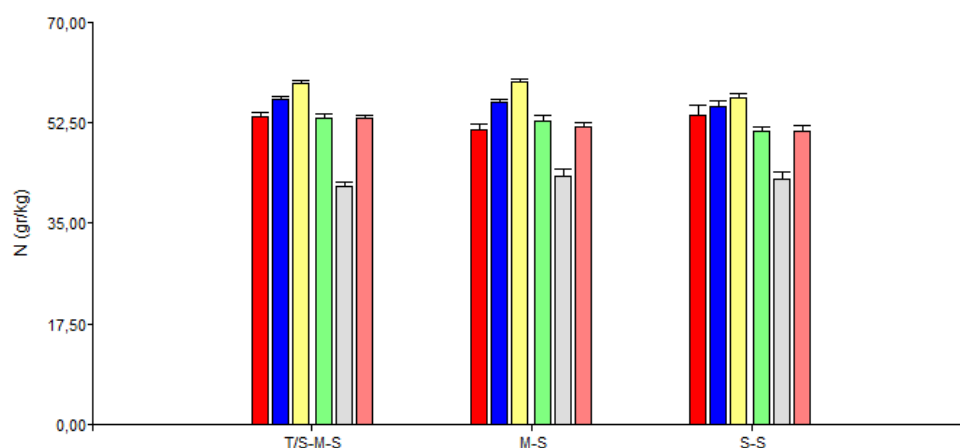


Figura 20: concentración de N en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

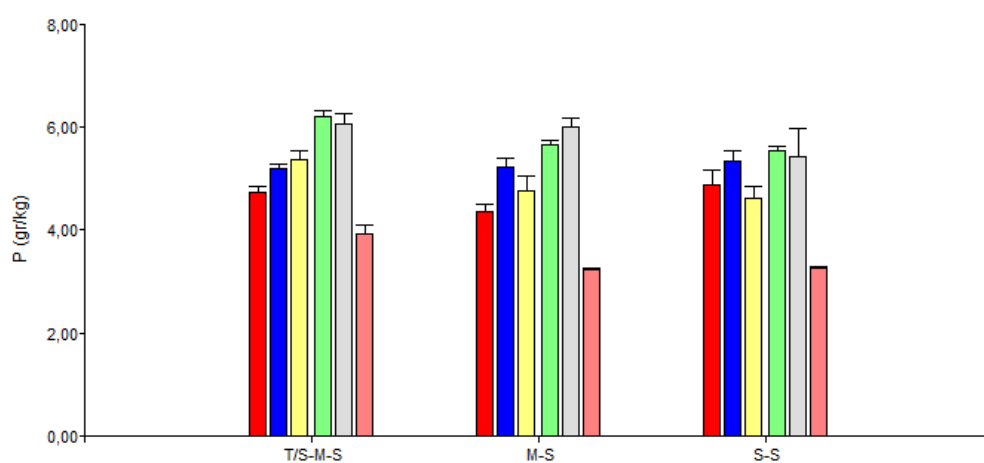


Figura 21: concentración de P en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

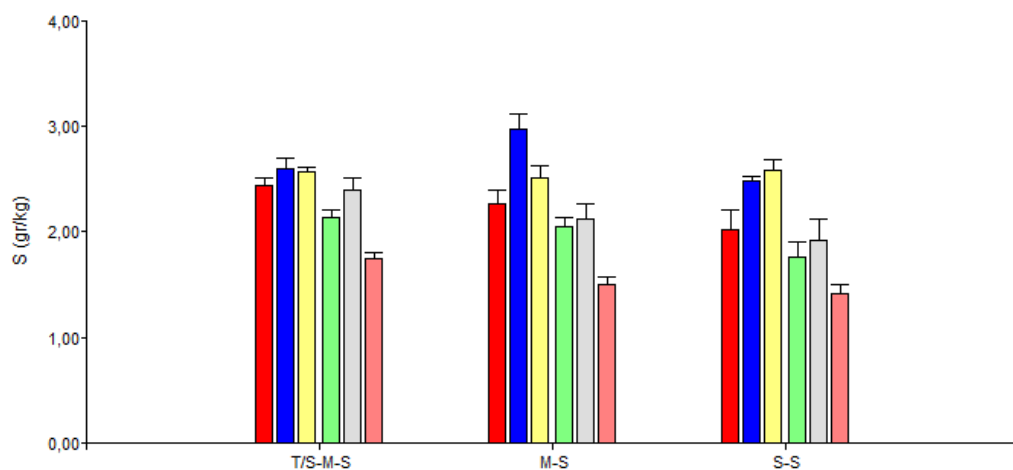


Figura 22: concentración de S en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

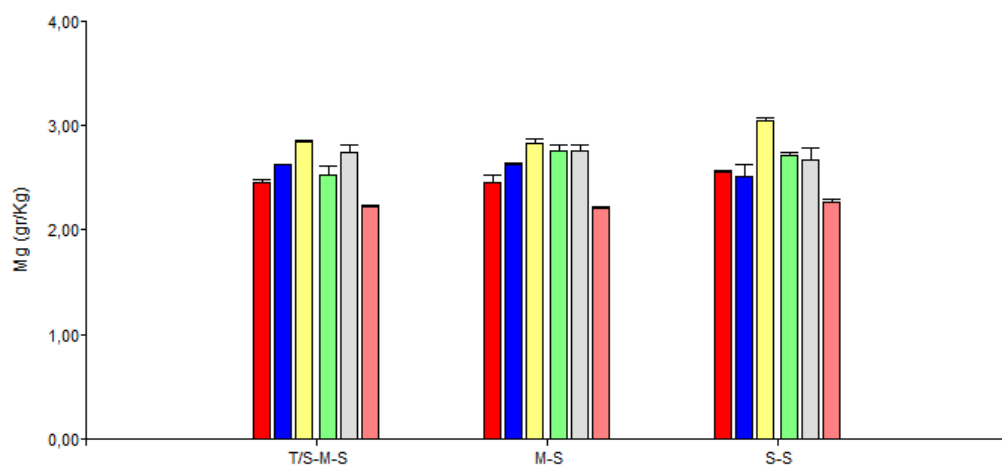


Figura 23: concentración de N en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

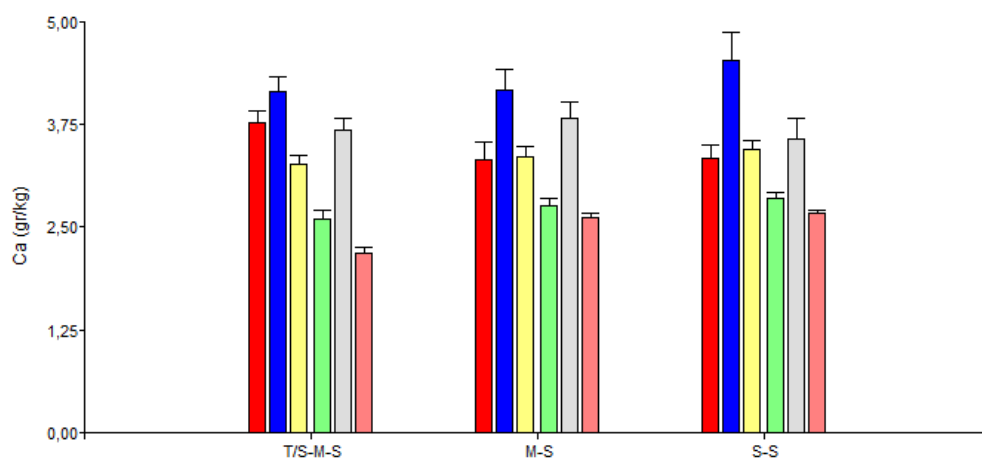


Figura 24: concentración de Ca en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

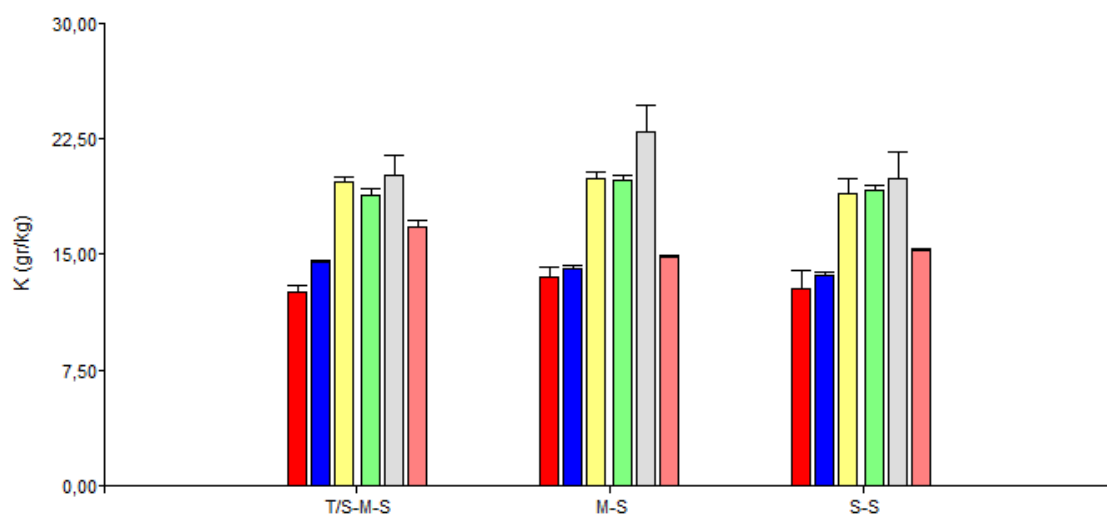


Figura 25: concentración de K en los granos a cosecha. Cada color corresponde a una campaña del ensayo. (rojo: 14-15; azul: 15-16; amarillo: 16-17; verde: 18-19; gris: 19-20; rosa: 21-22)

Bibliografía

Andrew, C.S. 1976. Nutritional restraints on legumes symbiosis. In: Exploiting the legume-Rhizobium symbiosis in tropical agriculture. Ed. by J.M. Vincent. A.S. Whitney and J. Bose. University of Hawaii College of Tropical Agriculture, Misc. Publ. 145. p. 253-274.

Bellaloui, N.; Bruns, H. A.; Gillen, A. M.; Abbas, H. K.; Zablotowicz, R. M.; and Paris, Robert L., "Soybean seed protein, oil, fatty acids, and mineral composition as influenced by soybean-corn rotation" (2010). Science and Mathematics Faculty Publications. 164.

http://digitalcommons.cedarville.edu/science_and_mathematics_publications/164

Biel W., Gawęda D., Jaroszewska A., Hury G. (2018) Content of minerals in soybean seeds as influenced by farming system, variety and row spacing. J. Elem., 23(3): 863-873. DOI:10.5601/jelem.2017.22.3.1483

Bruulsema, T. W., Heffer, P., Welch, R. M., Cakmak, I., & Moran, K. Fertilizing crops to improve human health: a scientific review. First edition, IPNI, Norcross, GA, USA; IFA, Paris, France, October 2012

Capurro, J; Dickie, M. J; Ninfi, D; Zazzarini, A; Tosi, E; González, M.C. Gramíneas y leguminosas como cultivos de cobertura para soja. (2012) Para mejorar la producción. 47: 83-88. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-gramneas-leguminosas-como-cultivos-cobertura-para-soj.pdf>

Cardin, R. (2019). Informes de Cadenas de Valor – Oleaginosas: soja septiembre 2019, Subsecretaría de Programación Microeconómica. ISSN 2525-0221.

Carver, R. E.; Nelson, N. O.; Abel, D. S.; Roozeboom, K.; Kluitenberg, G. J.; Tomlinson, P. J.; and Williams, J. R. (2017) "Impact of Cover Crops and Phosphorus Fertilizer Management on Nutrient Cycling in NoTillage Corn-Soybean Rotation," Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports: Vol. 3: Iss. 3. <https://doi.org/10.4148/2378-5977.1396>

Caviglia, O. P., & Andrade, F. H. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. Am. J. Plant Sci. Biotechnol, 3(1), 1-8.

Ciampitti, I. A., García, F. O. (2007), Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios I. Cereales, oleaginosas e industriales, Informaciones Agronómicas del Cono Sur, 33: 13-16.

Conti, M. E. Principios de Edafología. Buenos Aires, Argentina, Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, 2da edición, 2000, pág. 160.

Datos correspondientes a la Estación Meteorológica de Pergamino. (s. f.). INTA EEA Pergamino. <https://anterior.inta.gov.ar/pergamino/servicios/climatologia/resumen.htm>

Davèrède, I. C., Míguez, F. H., Borracci, A. A., (2019) Phosphorus, nitrogen, sulfur, boron and zinc fertilization effects on soybean yield and quality. Int. J. Curr. Res. Biosci. Plant Biol. 6(11), 9-21. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcrbp.2019.611.002>

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

FAO. 2018. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Rome. 224 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Ferrari, M. (2010). ¿Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables. Informaciones Agronómicas del Cono Sur, 48, 6-10.

Fraanje, W. & Garnett, T. (2020). Soy: food, feed, and land use change. (Food source: Building Blocks). Food Climate Research Network, University of Oxford.

García, F. O., González Sanjuan, M. F. (2012), La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos?, Revista Fertilizar, 24: 4-9

Hanway, J. J., & Weber, C. R. (1971). Accumulation of N, P, and K by Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Plants 1. *Agronomy Journal*, 63(3), 406-408.

Hernandez, D. P., & Dávila, D. Z. (2002). Efecto del fósforo sobre la población microbiana en suelos con pasturas en la zona altoandina de Junín. *Ecología Aplicada*, 1(1-2), pág-57.

<https://www.yara.com.ar/> Yara Argentina. Mayo 2023

Ignaciuk, A., Ilicic, J., Asprooth, L., Sitko, N.J., Bernard, A., Maggio, G., Tubiello, F.N. & Mueller, M. 2021. Progress towards sustainable agriculture – Drivers of change. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 13. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7896en>

Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS) (2002), Requerimientos nutricionales de los cultivos, Archivo agronómico No. 3: 1-4

Krueger, K., Goggi, A. S., Mallarino, A. P., & Mullen, R. E. (2013). Phosphorus and potassium fertilization effects on soybean seed quality and composition. *Crop Science*, 53(2), 602-610.

Lattanzi, A.; J. Arce; H.J. Marelli; C. Lorenzón y T. Baigorria, 2005. Efecto de largo plazo de la siembra directa y de rotaciones de cultivos sobre los rendimientos, el carbono y nitrógeno orgánico en un suelo Argiudol típico en Marcos Juárez. En: Seminario Internacional Indicadores de Calidad de Suelo (H. Marelli, ed.). EEA-INTA Marcos Juárez, 20 al 22 de abril de 2005, 20 p. (CD-Rom)

Marioli Nobile, C. G. Variabilidad de la calidad nutricional de soja en Argentina por efecto ambiental. Evaluación nutricional y sensorial de tofu como producto derivado (Tesis de doctorado en Ciencias Agropecuarias), Universidad Nacional de Córdoba (2016)

Masaquiza Moposita, D. A., Pereda Mouso, J., Curbelo Rodríguez, L. M., Figueredo Calvo, R., & Cervantes Mena, M. (2017). Intensificación de los sistemas agropecuarios y su relación con la productividad y eficiencia. Resultados con su aplicación: Artículo de Revisión. *Revista de producción Animal*, 29(2), 57-64.

Mc Donald, P., et.al., Nutrición animal. España, editorial Acribia, S.A., 5.a edición, 1999, págs. 89-115

Melgar, R. (2011), Balances de Nutrientes - La reposición de nutrientes en EE. UU., Brasil y Argentina: tres escenarios contrastantes, Revista Fertilizar, 19: 5-11

Melgar, R., “Hoy por hoy no se concibe la agricultura sin el uso de fertilizantes”. Entrevista. Revista Fertilizar, 29 (septiembre 2014), págs. 23-24

OECD/FAO (2022), OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/820ef1bb-es>.

Rozas, H. S., Eyherabide, M., Echeverría, H. E., Barbieri, P., Angelini, H., Larrea, G. E., Barraco, M. (2013). ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En Conferencia International Plant Nutrition Institute IPNI y Fertilizar.

Soliman, M.F., and M.A. Farah. 1985. Effect of phosphorus, nitrogen-fertilization and foliar applied manganese on yield and nutrient concentration of soybean. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 16:361–374. doi:10.1080/00103628509367611

USDA Foreign Agricultural Service. Oilseeds: World Markets and Trade. (2022), USDA Economics, Statistics and Market Information System (ESMIS). <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usdaesmis/files/tx31qh68h/hq37wz129/wd377597b/oilseeds.pdf>

Valdettaro, M. Uso de nutrientes en secuencias de cultivos con niveles de intensificación contrastantes (Proyecto de trabajo final de ingeniero agrónomo). Universidad de Buenos Aires (2020)

Wong Chang, I. A. Efecto de la fertilización con nitrógeno y fósforo sobre la fijación de nitrógeno y rendimiento en frijol común (tesis de ingeniero agrónomo), Escuela agrícola panamericana (abril, 1992)