



PROYECTOS ESPECÍFICOS DE INVESTIGACIÓN Y VALIDACIÓN 2023

“USO POTENCIAL DE FOSFORITA COMO ALTERNATIVA PARA FERTILIZACIÓN DE FOSFORO EN SUELOS ALCALINOS DE NAVOJOA SONORA”

Investigador responsable del proyecto: Dra. Mari Carmen López Pérez.

Investigador responsable administrativo: Fabián Pérez Labrada.

Investigadores colaboradores: Irene Iliana Ramírez Bustos; José Luis Espinoza Acosta; Elizabeth García León, Gustavo Corral Amparan.

Informe final del proyecto y actividades

RESUMEN

Los suelos calcáreos, contienen alta cantidad de carbonatos de calcio (CaCO_3) lo cual genera un pH de reacción alcalina (>7.5), afectando la absorción de algunos nutrientes y bajo crecimiento y rendimiento de los cultivos. En el presente estudio se evaluó la respuesta del cultivo de cártamo y trigo, desarrollado en suelo calcáreo, con adiciones de fosforita. Para ello, los cultivos de cártamo var. chey-ol y trigo var. Don Lupe fueron desarrollados bajo condiciones de campo abierto. Los tratamientos para cártamo consistieron en la aplicación de fósforo en dos dosis (50 y 37.5 kg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$), utilizando diversas fuentes: 192.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-L), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-L), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-L) y un control (0 kg P ha^{-1} ; CK). Los tratamientos para trigo consistieron en la aplicación de fósforo en dos dosis (80.5 y 60.4 kg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$), utilizando las fuentes: 309.6 kg de PHO-N ha^{-1} , 232.3 kg de MAP-N ha^{-1} , 154.8 kg de MKP-N ha^{-1} , 116.2 kg MKP-B ha^{-1} , 154.8 kg de MAP-N ha^{-1} , 116.2 kg de MAP-B ha^{-1} y un control (0 kg P ha^{-1} ; CK). A los 81 y 115 días después de la siembra (dds) se tomaron muestras de solución del suelo (SS), donde se determinó conductividad eléctrica, potencial de óxido-reducción y la concentración de sodio, nitratos, potasio y calcio, además de variables agronómicas y de rendimiento en cártamo y trigo. En cártamo, la adición de PHO-N y MAP-N al suelo indujo un incremento de la altura, diámetro de tallo y peso seco. En la SS se encontró un incremento de la CE en los tratamientos PHO-B, PHO-N, MAP-B y CK, de los 84 a 125 dds, siendo el tratamiento PHO-B quien presentó menor el menor valor de esta variable. El contenido de NO_3^- se redujo considerablemente del 1er al 2do muestreo en todos los tratamientos, siendo PHO-B (84 dds) quien presentó mayor concentración. El contenido de K^+ fue mayor en los tratamientos PHO-B, MKP-N y MAP-N (84 dds). En la correlación de Spearman

sobre los parámetros de la SS, demuestran que el pH1 tuvo una correlación negativa con todos los parametros medidos, caso contrario a EC1 al tener correlación positiva con la mayoría. ORP tuvo una correlación positiva con los cationes medidos en el M1 y negativa con los parametros medidos del M2. NO_3^- correlación positiva con los cationes medidos del M1. El pH2 se observo correlacionado negativamente con todos los parametros cuantificados del M2, finalmente EC2, NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} se correlacionaron positivamente con los cationes medidos en el M2. En las variables de rendimiento las plantas fertilizadas con PHO se comportaron igual que el resto de las enmiendas de fósforo. Todos los tratamientos indujeron un comportamiento similar en la mayoría de las variable evaluadas en el cultivo de trigo. El uso de fosforita puede ser una alternativa para remplazar el uso de fertilizantes químicos de fosforo.

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos calcáreos se presentan en gran parte del mundo (30-37%) y generalmente se asocia a regiones con baja precipitación anual (500 mm) (Wahba et al., 2022). En las regiones del norte de México, presentan suelos con estas características. Las principales características de estos suelos es la alta presencia de carbonatos de calcio (CaCO_3) lo cual genera un pH de reacción alcalina (>7.5) debido al incremento de HCO_3^- (Bolan et al., 2023). Estas condiciones afectan la absorción de algunos nutrientes minerales lo que ocasiona deficiencias en la planta de Fe, B, Zn, P y N, principalmente (López Pérez et al., 2024). Por otra parte, el uso continuo de fertilizantes químicos genera modificaciones físicas, químicas y biológicas en el suelo. Además, el uso irracional y/o inadecuado de los fertilizantes, puede alterar el pH, conductividad eléctrica (CE), el potencial de óxido reducción (ORP) y puede promover salinización de los suelos, afectando el desarrollo de los cultivos agrícolas (Kodaolu et al., 2024). En ese sentido, las prácticas de fertilización en suelos calcáreos presentan un gran reto ya que por un lado se debe garantizar el aporte adecuado y continuo de nutrientes a la planta evitando problemas de adsorción, lixiviación y salinización del suelo.

Aunado a lo anterior el inadecuado conocimiento del uso racional de los fertilizantes químicos provoca una merma en la producción acompañado de mermas en la calidad del suelo, así mismo eleva los costos de producción, reduciendo las ganancias, es por ello por lo que se requiere desarrollar investigaciones que permitan robustecer los paquetes tecnológicos y con ello alcanzar un mejor desarrollo y producción de los cultivos. Bajo esta tónica es imperativo considerar el concepto “4R” (dosis y fuente adecuada de fertilizante, momento oportuno y lugar óptimo de la fertilización) para promover una eficiencia en el uso de los fertilizantes (McDowell y Haygarth, 2024). Generalmente en suelos calcáreos se recomienda la aplicación de fertilizantes de

reacción ácida y con un bajo índice de salinidad, sobresaliendo el fosfato monoamónico (MAP) y el fosfato diamónico (DAP) como fuentes de fósforo (P) y nitrógeno (N) en forma de amonio (NH_4^+). De igual manera el fosfato monopotásico (MKP) por su solubilidad suele ser utilizado en este tipo de suelos, al igual que el ácido fosfórico (Lu et al., 2024). Si bien el uso de estos fertilizantes incrementa el contenido de P en la solución del suelo (SS) las propiedades del suelo calcáreo pueden conllevar a una rápida adsorción con los carbonatos generando deficiencias de este ion en etapas avanzadas del cultivo.

Actualmente, el uso de fertilizantes alternos como la fosforita [roca fosfórica; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$] ha sido documentado, este material es un mineral orgánico que libera de manera continua y prolongada P, CaO y SiO_2 al suelo además de micronutrientes como manganeso (MnO) y zinc (Zn), por lo que puede ser una alternativa para proveer P a cultivos desarrollados en suelo calcáreo (Rout, et al., 2024).

En este contexto, en la región del Valle del Mayo en Navojoa, Sonora, se cuenta con las condiciones ideales para el desarrollo de cultivos de gramíneas y Asteraceae, siendo cultivos comunes desarrollados en esta región. El empleo de cultivos ya conocidos y establecido en la región, como lo es el cultivo de trigo (*Triticum aestivum*) y cártamo (*Carthamus tinctorius*), dará la pauta a la comparación y generación de mayor información que pueden ayudar a entender de manera más completa el efecto de la fosforita como fuente de fosforo en el suelo alcalino característico del Valle de Mayo, reflejandose en el desarrollo y rendimiento de los cultivos de trigo y cártamo. Por lo anterior, el objetivo de este proyecto de investigación fue documentar la respuesta del cultivo de cártamo y trigo, desarrollado bajo suelo calcáreo, a la aplicación de fosforita, verificando las fluctuaciones de parámetros químicos y contenido de iones en la solución del suelo.

2. Objetivo General:

Verificar el uso potencial del mineral orgánico fosforita como fuente de fosforo en cultivos desarrollados en suelo para promover su rendimiento.

2.1. Objetivos específicos:

- Determinar si la fuente de fosforo a base de fosforita puede funcionar como alternativa de fertilizantes químicos fosforados.
- Determinar la fluctuación de pH, CE y ORP empleando diferentes dosis y fuentes de fertilizantes en un suelo calcáreo.
- Determinar dosis adecuadas de fertilización y fosforita para cártamo.
- Determinar las dosis adecuadas de fosforita en el cultivo de trigo.

- Medir el desarrollo y rendimiento, variables químicas y concentración de iones del cultivo de trigo y cártamo al emplear fosforita como fuente de fósforo.

3. MARCO METODOLÓGICO.

El trabajo experimental se estableció en parcela de producción del municipio El Recodo, Navojoa, Sonora, México (27.069142-N, -109.512600-W). En esta zona presenta un clima seco, semiseco y muy seco, con una temperatura media anual de 22 °C y 50 mm de precipitación anual promedio. Como material biológico se utilizaron semillas de plantas de cártamo (*Carthamus tinctorius* var. Chey-ol), y trigo (*Triticum aestivum* L. var. Don Lupe) las cuales fueron sembradas directamente sobre el suelo calcáreo (Tabla 1).

Tabla 1. Características del suelo calcáreo de El Recodo, Navojoa, Sonora.

Características químicas	Valor
pH	8.82±0.05
CE	0.36±0.02 dS/m
Materia orgánica	0.77±0.19%
Na ⁺	94.67±4.04 ppm
NO ₃ ⁻	3.29±0.16 ppm
K ⁺	186.67±4.93 ppm
Ca ²⁺	2987.33±73.82 ppm
P-Bray	18.83±1.70 ppm

Todos los valores son la media de tres determinaciones.

3.1. Laboreo del suelo.

Primeramente, el 28 de noviembre de 2024 se llevó a cabo la labranza del suelo, para ello se realizó, con ayuda de un tractor e implementos de tractor, doble rastreo, bordeo y dentro de ellos los surcos para posteriormente realizar la siembra (Figura 1).

3.2. Siembra y riego del cártamo y trigo

Cártamo: la siembra se llevó a cabo el 1 de febrero de 2024 de manera manual, la densidad de siembra empleada fue de 22 semillas/m lineal. Se realizaron dos riegos por gravedad en todo el ciclo del cultivo, el primero dos días antes de la siembra y el segundo en prefloración (90 dds), con una lámina de riego menor a la primera (Figura 2a).

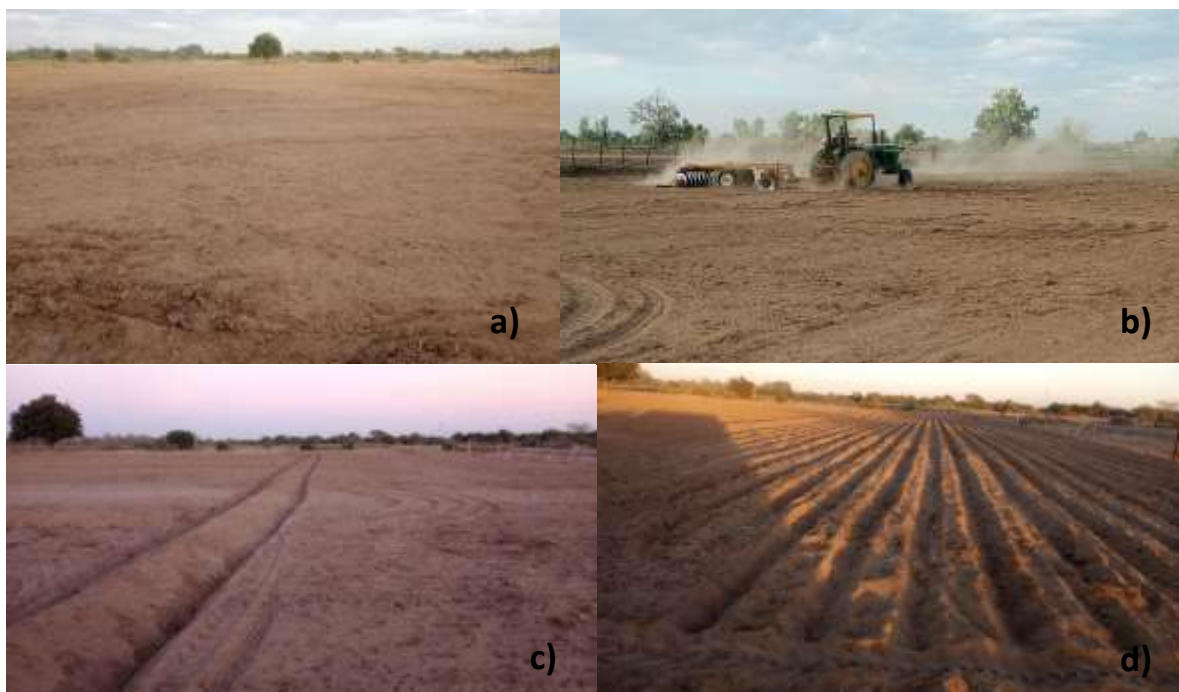


Figura 1. a) Parcela de producción en el municipio El Recodo, Navojoa, Sonora, México (27.069142-N, -109.512600-W), propietario: Gustavo Corral Osuna. b) Laboreo del suelo. c) y d) Formación de los surcos para el desarrollo de trigo y cártamo.

Trigo: la siembra se realizó el 20 de diciembre de 2023 de manera manual, en surcos con dos hileras, usando la densidad de siembra 60 kg/ha de semilla. Se realizaron 3 riegos por gravedad; uno para la emergencia de la semilla (2 días antes de la siembra), el segundo como auxilio (30 días después de la siembra) y el tercero para la cosecha.



Figura 2. a) Riego por gravedad de la parcela, b) siembra del cultivo de cártamo, c) siembra del cultivo de trigo.

3.4. Fertilización de cártamo y trigo.

Cártamo: la fertilización aplicada fue de 125 kg/ha de N total, 50 kg/ha de P_2O_5 , 10 kg/ha de K_2O , 30 kg/ha de SO_4^{2-} , 5 kg/ha de CaO y 5 kg/ha de MgO, además de aportar 4 ppm de Fe. Como fuente de fertilizantes se usaron fosfato monoamónico, fosfato monopotásico, urea, sulfato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, micronutrientes (Micromix-Mezfer crown) y roca fosfórica orgánica mineral (P_2O_5 : 26%, CaO: 34%, SiO_2 : 16%, molida a malla 80 (Fosforita de México® S.A. de C.V.). El manejo fitosanitario se llevó de acuerdo con lo recomendado para el cultivo.

Los tratamientos consistieron en la aplicación de fósforo en dos dosis (50 y 37.5 kg de P_2O_5 /ha), utilizando diversas fuentes, a saber: 192.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha^{-1} ; CK) (Tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos empleados en el cultivo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo.

Tratamiento	Abreviación	Descripción
1	PHOS-B	Fosforita dosis baja
2	PHOS-N	Fosforita dosis normal
3	MKP-B	Fosfato monopotásico dosis baja
4	MKP-N	Fosfato monopotásico dosis normal
5	MAP-B	Fosfato monoamónico dosis baja
6	MAP-N	Fosfato monoamónico dosis normal
7	T0	Control

Trigo: la fertilización aplicada fue de 210 kg/ha de N total, 80.5 kg/ha de P_2O_5 , 159.6 kg/ha de K_2O , 32.2 kg/ha de SO_4^{2-} , 29.4 kg/ha de CaO y 34.9 kg/ha de MgO, además de aportar 1.6 kg/ha de Fe. Como fuente de fertilizantes se usaron fosfato monoamónico, fosfato monopotásico, urea, sulfato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, micronutrientes (Micromix-Mezfer crown) y roca fosfórica orgánica mineral (P_2O_5 : 26%, CaO: 34%, SiO_2 : 16%, molida a malla 80 (Fosforita de México®

S.A. de C.V.). El manejo fitosanitario se llevó de acuerdo con lo recomendado para el cultivo.

Los tratamientos consistieron en la aplicación de fósforo en dos dosis (80.5 y 60.4 kg de P_2O_5/ha), utilizando diversas fuentes, a saber: 309.6 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 232.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 154.8 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 116.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 154.8 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 116.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha^{-1} ; CK) (Tabla 3).

Tabla 3. Tratamientos empleados en el cultivo de trigo desarrollado en suelo calcáreo.

Tratamiento	Abreviación	Descripción
1	PHOS-B	Fosforita dosis baja
2	PHOS-N	Fosforita dosis normal
3	MKP-B	Fosfato monopotásico dosis baja
4	MKP-N	Fosfato monopotásico dosis normal
5	MAP-B	Fosfato monoamónico dosis baja
6	MAP-N	Fosfato monoamónico dosis normal
7	T0	Control



Figura 4. Fertilización de suelo calcáreo previo a la siembra del cultivo de cártamo y trigo.

3.5. Medición de las variables agronómicas, químicas y concentración de iones.

A los 0, 26, 84 y 125 días después de la siembra (dds) se tomaron muestras de solución del suelo con lisímetros de succión (Irrometer®); los lisímetros se colocaron a una distancia de 5 cm del tallo en ángulo de $\approx 75^\circ$ y a 15 cm de profundidad, enseguida se aplicó presión de succión a 60 centibares, a las 24 hrs se extrajo con jeringa un volumen ≈ 20 mL de muestra (Figura 5). En el caso del cultivo de trigo, derivado de la falta suficiente de agua, se optó por obtener la solución de suelo con otra metodología (descrita por Proain®), consistió en el uso de 1.2 kg de suelo seco mezclado con 400 mL de agua de riego, se realizó un pasta homogénea con un recipiente de 1.5 L, posteriormente se colocó el lisímetro de succión dentro de la pasta homogénea, hasta cubrir la capa porosa y se esperó 1.5 hr para la obtención de la solución (Figura 6d), a los 140 ddd.

De manera inmediata se cuantificó *in situ* el pH (Hanna, HI98130), conductividad eléctrica (CE, Hanna, HI98130), potencial de óxido-reducción (ORP, HM Digital ORP-200). Las muestras fueron congeladas a -20°C , y posteriormente se determinó la concentración de sodio (Na^+), nitratos (NO_3^-), potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) usando iones-selectivos (Horiba-LAQUAtwin) y fósforo (P) (Checker Hanna, HI706).



Figura 5. Colecta de solución del suelo en el cultivo de cártamo. a) y c) Técnica del uso del lisímetro. b) Solución del suelo colectado.

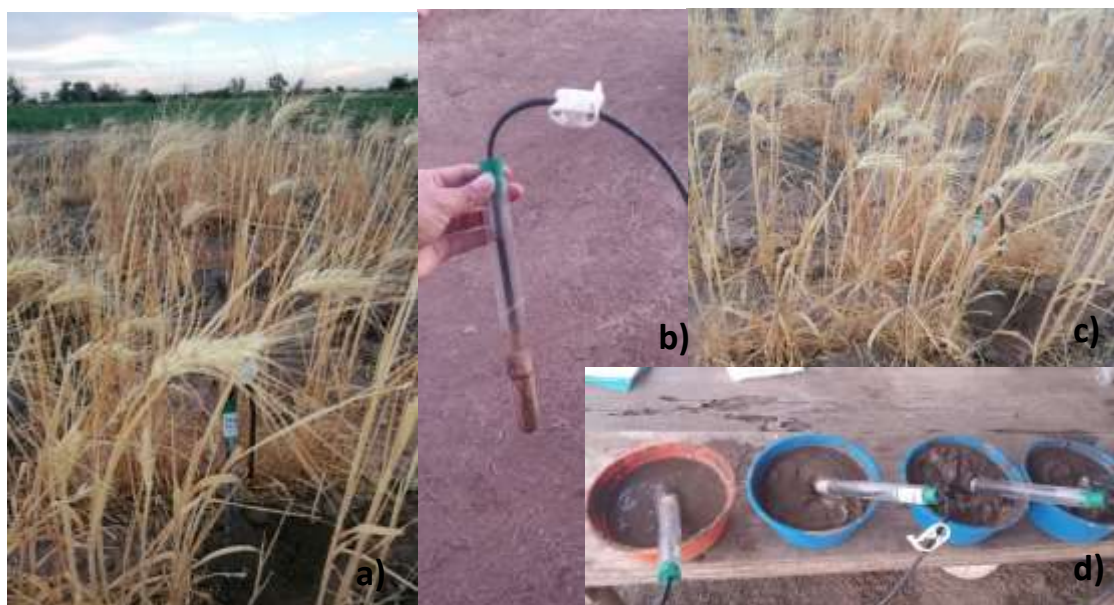


Figura 6. Colecta de solución del suelo en el cultivo de cártamo. a) y c) Técnica del uso del lisímetro. b) Solución del suelo colectado. d) Técnica para la obtención de solución del suelo.

En el cártamo se midió la altura (con ayuda de un flexómetro), diámetro de tallo (vernier digital), número de ramas, número de capítulos, a los 110 dds (Figura 7a y b). Una vez obtenidas los capítulos correspondientes a cada tratamiento, se procedió a realizar la trilla manual de las plantas. Se obtuvo el peso seco de 100 capítulos y de 1000 granos (gramos) y se realizó el cálculo de rendimiento por hectárea (k ha^{-1}) (se ajusto al 8% de humedad del grano), el peso seco se determinó al finalizar el ciclo del cultivo (Figura 7c y d).



Figura 7. Medición de variables agronómicas; altura y diametro de tallo. a) y b) Cártamo. c) y d) Trigo.

En el trigo se midió la altura (flexómetro), diámetro de tallo (vernier digital) y número de macollos a los 160 dds, se consideró 3 surcos por bloque de una longitud de 1 metro lineal, resultando en 3 metros lineales cosechados por parcela. Una vez obtenidas las espigas correspondientes a cada tratamiento, se procedió a realizar la trilla manual de las plantas. Se obtuvo el peso de 100 espigas, el peso de 1000 granos (gramos) y se realizó el cálculo de rendimiento por hectárea (k ha^{-1}) (se ajustó al 13% de humedad del grano), el peso seco se determinó al finalizar el ciclo del cultivo (Figura 7c y d).

3.6. Diseño experimental.

El diseño experimental empleado fue bloques (3) completos al azar, con 10 repeticiones por tratamiento. La parcela consistió en 6 surcos por tratamiento por bloque (18 surcos totales); el surco fue de 20 m de longitud por 0.85 m de ancho. La parcela útil fue de 16 m por surco por bloque. Sobre los datos se aplicó análisis de medidas repetidas en el tiempo (RM-ANOVA) seguida de prueba de medias de Fisher. Sobre los datos de la solución del suelo se aplicó análisis de correlación de Spearman ($p < 0.05$). Se utilizó el programa SigmaPlot v12.0. para los análisis.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cultivo de cártamo

Las variables agronómicas evaluadas (Tabla 4) presentaron diferencias significativas entre tratamientos y en la interacción bloque*tratamiento ($T*B$) ($p < 0.05$). Se encontró que la altura, diámetro de tallo y peso seco fue mayor en los tratamientos PHO-N y MAP-N, a los 110 dds, así mismo el N° de ramas y capítulos fue mayor en MAP-N, en comparación a CK.

Tabla 4. Variables morfológicas del cultivo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	Altura (cm)	N° de ramas	N° capítulos	Diámetro tallo (mm)	Peso seco planta (g)
PHO-B	54.65 ^b	15.53 ^b	24.40 ^{bc}	9.43 ^b	36.39 ^c
PHO-N	67.03 ^a	18.13 ^c	28.33 ^b	10.74 ^a	55.56 ^a
MAP-B	46.1 ^c	10.47 ^d	12.27 ^d	6.44 ^d	22.15 ^c
MAP-N	65.47 ^a	22.17 ^a	34.13 ^a	10.42 ^a	55.56 ^{ab}
MKP-B	54.37 ^b	14.87 ^c	21.27 ^c	8.63 ^c	35.63 ^c
MKP-N	54.2 ^b	14.80 ^c	22.40 ^c	8.37 ^c	52.23 ^b

CK	48.38 ^c	9.43 ^d	11.83 ^d	6.49 ^d	24.39 ^c
<i>Tratamiento (T)</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<i>Bloque (B)</i>	<0.0001	0.3327	0.0249	0.4223	0.3815
<i>T*B</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 192.3 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-B), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-B), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha⁻¹; CK).

En el peso de 100 capítulos no se encontraron diferencias estadísticas, sin embargo, se apreció que en los tratamientos con PHO, esta variable fue menor, respecto del resto de los tratamientos. Tampoco se encontraron diferencias significativas en el peso de 1000 semillas y rendimiento, se aprecia que PHO-B alcanzó el valor más bajo, respecto del resto de los tratamientos, cabe rescatar que PHO-N generó un incremento, respecto del testigo (Tabla 5).

Tabla 5. Variables de rendimiento del cultivo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	Peso seco de 100 capítulos (g)	Peso de 1000 semillas	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)
PHO-B	91.1 ^a	23.13 ^{ab}	3785.3 ^{ab}
PHO-N	78.5 ^a	26.6 ^{ab}	4353.2 ^{ab}
MAP-B	141.5 ^a	30.68 ^a	5020.9 ^a
MAP-N	155.6 ^a	26.89 ^{ab}	4400.9 ^{ab}
MKP-B	105.3 ^a	19.03 ^b	3114.5 ^b
MKP-N	159.3 ^a	27.66 ^{ab}	4527.7 ^{ab}
CK	92.2 ^a	25.99 ^{ab}	4253.7 ^{ab}
<i>Tratamiento (T)</i>	<0.5065	<0.0864	<0.0864

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 192.3 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-B), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-B), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha⁻¹; CK).

Dentro de los parámetros químicos de la solución del suelo (Tabla 6), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) para las variables CE y ORP, se observó un incremento de la CE en los tratamientos PHO-B, PHO-N, MAP-B y CK, y un decremento en el resto de los tratamientos, de los 84 a 125 dds, así mismo, el tratamiento PHO-B presentó menor CE a diferencia de CK (125 dds). El ORP fue

mayor en PHO-B en ambos muestreos, PHO-N presentó similar valor que CK y el resto de los tratamientos de P químicos.

Tabla 6.- Parámetros químicos de la solución del suelo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	pH		Conductividad eléctrica (dS/m)		Potencial de óxido-reducción (mV)	
	84 dds	125 dds	84 dds	125 dds	84 dds	125 dds
PHO-B	7.60 ^a	7.67 ^a	6.52 ^a	4.73 ^c	89.00 ^a	62.33 ^a
PHO-N	7.68 ^a	7.83 ^a	6.39 ^a	8.89 ^{ab}	57.50 ^b	54.67 ^{bc}
MAP-B	7.63 ^a	7.63 ^a	6.61 ^a	8.97 ^{ab}	58.00 ^b	57.33 ^{ab}
MAP-N	7.50 ^a	7.77 ^a	11.7 ^a	9.71 ^a	60.33 ^b	56.33 ^{ab}
MKP-B	7.83 ^a	7.70 ^a	8.97 ^a	6.89 ^{bc}	53.00 ^b	55.67 ^b
MKP-N	7.90 ^a	7.90 ^a	10.9 ^a	9.59 ^a	52.00 ^b	53.00 ^{bc}
CK	7.70 ^a	7.90 ^a	7.58 ^a	8.92 ^{ab}	55.75 ^b	49.00 ^c
Tratamiento (T)	0.7683		0.0241		<0.0001	
Muestro (M)	0.4381		0.8598		0.0227	
T*M	0.9597		0.4099		0.0227	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 192.3 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-B), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-B), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha⁻¹; CK).

El contenido de NO₃⁻ se redujo considerablemente del primer al segundo muestreo en todos los tratamientos, siendo PHO-B (84 dds) quien presentó mayor concentración. El contenido de K⁺ fue mayor en los tratamientos PHO-B, MKP-N y MAP-N (84 dds) en comparación de CK. En el resto de los minerales no se presentaron diferencias significativas (Tabla 7).

Tabla 7.- Concentración de iones en la solución del suelo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	NO ₃ ⁻		K ⁺		Ca ²⁺		Na ⁺	
	84 dds	125 dds	84 dds	125 dds	84 dds	125 dds	84 dds	125 dds
PHO-B	6266.67 ^a	1136.67 ^b	180.00 ^{ab}	115.33 ^a	1200.00 ^a	520.00 ^a	346.67 ^a	346.67 ^a
PHO-N	3125.00 ^b	1666.67 ^{ab}	100.00 ^{bc}	140.00 ^a	917.50 ^a	773.33 ^a	222.50 ^a	446.67 ^a
MAP-B	3750.00 ^{ab}	1933.33 ^{ab}	113.25 ^{bc}	130.00 ^a	770.00 ^a	750.00 ^a	230.00 ^a	413.33 ^a
MAP-N	4850.00 ^{ab}	2060.00 ^{ab}	202.50 ^a	160.00 ^a	1007.50 ^a	750.00 ^a	330.00 ^a	473.33 ^a

MKP-B	3080.00 ^b	3033.33 ^a	104.25 ^{bc}	158.11 ^a	820.00 ^a	896.67 ^a	275.00 ^a	466.67 ^a
MKP-N	3697.50 ^{ab}	2266.67 ^{ab}	183.50 ^{ab}	180.00 ^a	760.50 ^a	743.33 ^a	350.00 ^a	476.67 ^a
CK	2325.00 ^b	2150.00 ^{ab}	88.75 ^c	147.67 ^a	747.50 ^a	590.00 ^a	237.50 ^a	480.00 ^a
Tratamiento (T)	0.4966		0.0948		0.8557		0.7167	
Muestreo (M)	0.0001		0.5829		0.0633		<0.0001	
T*M	0.0386		0.2298		0.3747		0.5168	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 192.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 144.2 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 96.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 72.1 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 96.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 72.1 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha^{-1} ; CK). ^{ns}= $p>0.05$, *= $p<0.05$, **= $p<0.01$, ***= $p<0.001$.

En el contenido de P no se encontraron diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre tratamientos, sin embargo, se observaron diferencias numéricas en donde el contenido de P fue superior en la solución de suelo del tratamiento MAP-L y MAP-N, seguido de PHOS-B, el tratamiento PHOS-N obtuvo los menores resultados en comparación con el control (Figura 8).

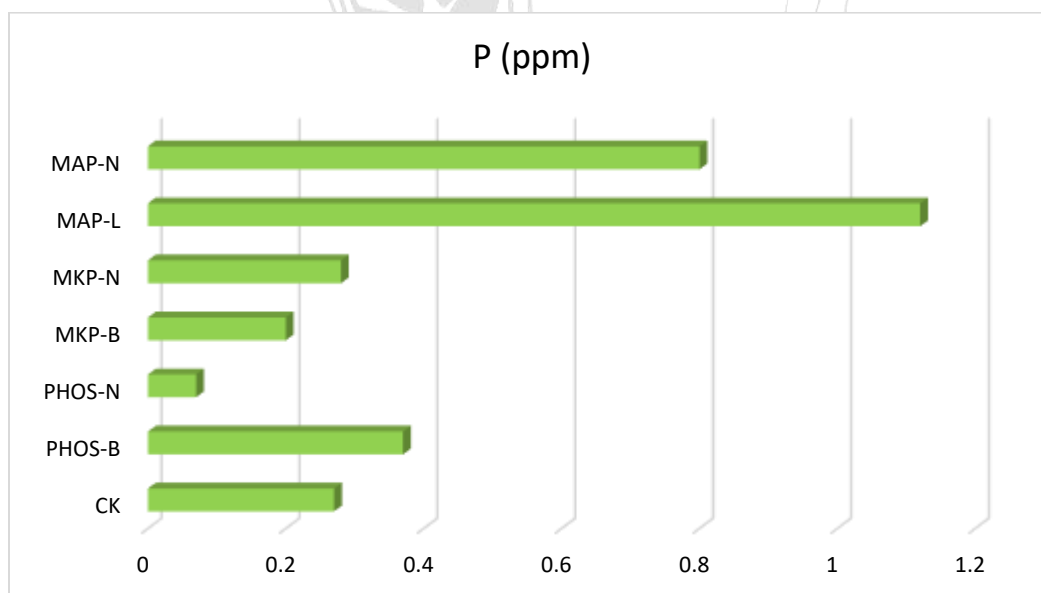


Figura 8. Contenido de fósforo (ppm) de la solución del suelo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita. 309.6 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 232.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 158.4 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 116.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 158.4 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 116.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha^{-1} ; CK).

Los datos obtenidos en la correlación de Spearman sobre los parámetros de la solución de suelo de los tratamientos (Tabla 8), demuestran que el pH del muestreo 1,

tuvo una correlación negativa significativa con la CE, ORP, NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y Na^+ del muestreo 1. Tanto la CE como el ORP (muestreo 1) tuvieron una correlación positiva significativa con NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y Na^+ del muestreo 1, pero el ORP1 tuvo una relación negativa con el Na^+ del muestreo 2, así mismo NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} se correlacionaron positivamente con los cationes analizados en este trabajo, ambos del muestreo 1, solamente el NO_3^- se correlacionó negativamente con Na^{+2} . En las variables medidas del muestreo 2, solamente pH2 se correlacionó negativamente con ORP2, NO_3^{-2} , K^+ y Ca^{2+} , el resto de las variables obtuvieron una correlación positiva; EC2 se correlacionó de manera positiva con todos los minerales medidos, de igual forma, ORP2 se correlacionó con Ca^{2+2} , NO_3^{-2} con todos los cationes evaluados, K^{22} con Ca^{2+} y Na^+ y finalmente Ca^{2+} con Na^+ .

Tabla 8.- Correlación de Spearman (Rho) de parámetros de la solución del suelo de cártamo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

	EC1	ORP1	NO_3^{-1}	K^{+1}	Ca^{2+1}	Na^{+1}	pH2	EC2	ORP2	NO_3^{-2}	K^{+2}	Ca^{2+2}	Na^{+2}
pH1	-0.44*	-0.64***	-0.75***	-0.39*	-0.62***	-0.44*	0.09 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.30 ^{ns}
EC1		0.24 ^{ns}	0.49**	0.50**	0.55***	0.70***	-0.04 ^{ns}	0.33 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.04 ^{ns}
ORP1			0.82***	0.60***	0.70***	0.60***	-0.25 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	0.26 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.52***
NO_3^{-1}				0.74***	0.81***	0.81***	-0.31 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.41*
K^{+1}					0.54***	0.86***	-0.21 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.19 ^{ns}	-0.17 ^{ns}
Ca^{2+1}						0.74***	-0.33 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.16 ^{ns}	-0.32 ^{ns}
Na^{+1}							-0.19 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.15 ^{ns}	-0.34 ^{ns}
pH2								-0.27 ^{ns}	-0.71***	-0.46**	-0.47**	-0.60***	-0.23 ^{ns}
EC2									-0.01 ^{ns}	0.68***	0.69***	0.67***	0.60***
ORP2										0.18 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.48**	0.17 ^{ns}
NO_3^{-2}											0.89***	0.81***	0.53***
K^{+2}												0.78***	0.60***
Ca^{2+2}													0.51**

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 1= 84 dds, 2= 125 dds
^{ns}= $p > 0.05$, *= $p < 0.05$, **= $p < 0.01$, ***= $p < 0.001$

Cultivo de trigo

Referente al cultivo de trigo, se determinó la altura de planta y se encontraron diferencias altamente significativas. Las plantas con mayor altura fueron las tratadas con MKP-B y MKP-N en comparación con el testigo. El resto de las plantas no tuvieron un crecimiento significativo, respecto del testigo. En el número de macollos no se encontraron diferencias significativas, sin embargo las plantas tratadas con MKP-N fueron las que mayor número de macollos obtuvieron, seguido de MKP-B y PHO-B en comparación al testigo. Se presentaron diferencias significativas en la variable diámetro

de tallo, siendo MAP-N quien indujo mayor diametro en las plantas de trigo, en comparación con el testigo (Tabla 9).

Tabla 9. Variables morfológicas del cultivo de trigo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	Altura (cm)	Nº de macollos	Diámetro tallo (mm)
PHO-B	50.8 ^{bc}	5.0 ^a	3.9 ^{bc}
PHO-N	48.6 ^c	4.6 ^a	3.8 ^{bc}
MAP-B	51.2 ^{abc}	4.4 ^a	3.9 ^{ab}
MAP-N	51.2 ^{abc}	4.0 ^a	4.4 ^a
MKP-B	56.4 ^a	5.0 ^a	3.5 ^b
MKP-N	56.0 ^{ab}	5.2 ^a	3.6 ^{bc}
CK	48.4 ^c	4.6 ^a	3.8 ^{bc}
<i>Tratamiento (T)</i>	<0.0196	<0.8654	<0.0055

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 309.6 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-N), 232.3 kg de fosforita ha⁻¹ (PHO-B), 158.4 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-N), 116.2 kg de fosfato monopotásico ha⁻¹ (MKP-B), 158.4 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-N), 116.2 kg de fosfato monoamónico ha⁻¹ (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha⁻¹; CK).

En las variables de rendimiento no se encontraron diferencias significativas pero si diferencias numericas muy marcadas. El peso de 100 tallos fue mayor en las plantas tartadas con MKP-B y PHO-B, en comparación con el testigo. Se observó que los tratamientos MAP-B, MKP-N y PHO-B presentaron mayor peso de 100 espigas. Respecto al peso de 1000 semillas y rendimiento, los tratamientos MKP-N, MAP-B y PHO-B fueron los que indujeron un incremento respecto al testigo (Tabla 10).

Tabla 10. Variables morfológicas del cultivo de trigo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita.

Tratamiento	Peso seco de 100 tallos (g)	Peso seco de 100 espigas	Peso de 1000 semillas	Rendimiento (Kg ha ⁻¹)
PHO-B	386.5 ^a	52.2 ^a	25.9 ^a	5436.0 ^a
PHO-N	343.8 ^a	50.2 ^a	26.2 ^a	5478.0 ^a
MAP-B	348.8 ^a	52.4 ^a	26.5 ^a	5561.9 ^a
MAP-N	378.8 ^a	50.7 ^a	25.8 ^a	5457.0 ^a
MKP-B	397.5 ^a	49.3 ^{ab}	26.0 ^a	5457.0 ^a
MKP-N	383.8 ^a	52.3 ^a	25.9 ^a	5415.0 ^a

CK	343.5 ^a	49.8 ^{ab}	25.5 ^a	5362.7 ^a
Tratamiento (T)	<0.546	<0.8654	<0.756	<0.8856

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). 309.6 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 232.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 158.4 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 116.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 158.4 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-N), 116.2 kg de fosfato monoamónico ha^{-1} (MAP-B) así como un control donde no se adicionó fuente alguna de P (0 kg P ha^{-1} ; CK).

En la figura 9 se presentan el pH, CE y la concentración de iones de la solución del suelo, no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de las variables medidas. En el pH y CE no hubo diferencias significativas entre tratamientos, el ORP se presentó en mayor concentración en el tratamiento testigo y el resto de los tratamientos fueron menores, los tratamientos de PHO fueron los que generaron los valores más bajos. El contenido de NO_3^- fue mayor en MAP-N seguido de PHO-B y MKP-N, caso contrario con K^+ donde todos los tratamientos redujeron esta concentración en la solución del suelo de cartamo. Ca^{2+} fue mayor en el tratamiento de MKP-N, seguido de PHO-N, respecto del testigo. La concentración de Na^+ incrementó en todos los tratamientos siendo mayor en los tratamientos de PHO.

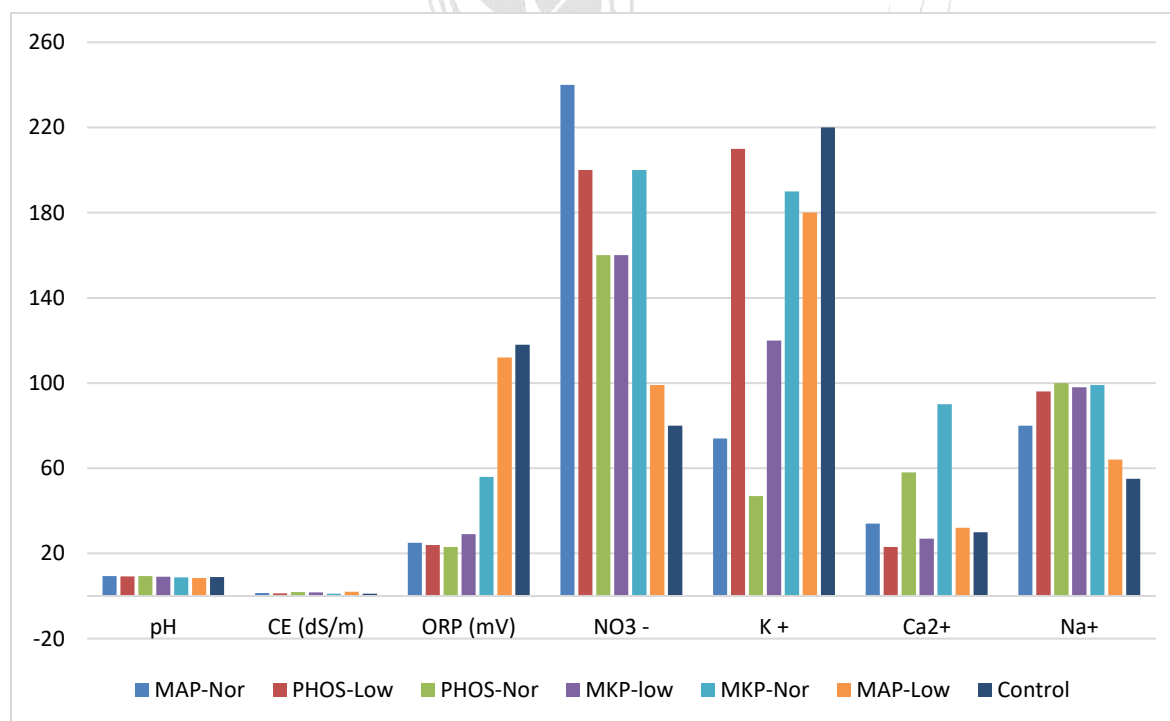


Figura 9. Concentración de iones en la solución del suelo de trigo desarrollado en suelo calcáreo con aplicación de fosforita. 309.6 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-N), 232.3 kg de fosforita ha^{-1} (PHO-B), 158.4 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-N), 116.2 kg de fosfato monopotásico ha^{-1} (MKP-B), 158.4 kg de

Manejo de plagas, enfermedades y malezas	x	x	x	x	x	x								x	100
Cosecha trigo y cártamo					x	x									100
Colecta de datos agronómicos				x	x	x									100
Colecta de solución de suelo		x		x		x								x	
Medición de variables químicas y concentración de iones	x	x	x	x	x	x	x							x	
Análisis de datos				x	x	x	x	x	x	x					100
Congreso									x	x	x				100
Ficha técnica									x	x	x				100
Borrador de artículo científico									x	x	x				100
Artículo científico (2025)												x			100
Avance de informe							x	x	x						100
Informe final											x	x			100

****Las actividades realizadas se resaltan en color verde y las actividades próximas a realizar en color rojo.**

7. CONCLUSIÓN

La fosforita puede actuar como a un fertilizante químico, sin afectar al crecimiento y desarrollo del cultivo de cártamo y trigo, así mismo, la fosforita reduce la conductividad eléctrica, mejorando el ORP, actuando igual o mejor, que las enmiendas químicas, en la absorción de los nutrientes NO_3^- y K^+ , en los cultivos de cártamo y trigo. De igual manera, en el cultivo de trigo la fosforita no perjudicó la absorción de los minerales, actuando de igual manera que los fertilizantes químicos analizados; MAP y MKP. La adición de fosforita no afectó al rendimiento de los cultivos de cártamo y trigo. El uso de fosforita puede ser una alternativa para remplazar el uso de fertilizantes químicos de fósforo.

8. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores participantes agradecen al Patronato para la Investigación y Experimentación Agrícola del Estado de Sonora, A.C. (PIEAES®) por el financiamiento de este proyecto de investigación. Gracias a su apoyo, hemos podido contar con los recursos necesarios para llevar a cabo el estudio, lo que ha facilitado, además, la formación de estudiantes y la generación de nuevo conocimiento en el área, abriendo paso a nuevos trabajos de investigación. Así mismo, agradecen al Sr. Gustavo Corral Osuna por la facilitación de terreno para el desarrollo de la investigación.

9. BIBLIOGRAFÍA

- López-Pérez, M. C., Espinoza-Acosta, J. L., & Pérez-Labrada, F. (2024). Iron nutrition management in calcisol soils as a tool to mitigate chlorosis and promote crop quality—An overview. *Journal of Applied Biology & Biotechnology Vol*, 12(1), 17-29.
- Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C. S., Satyanaraya, P. V., Anderson, G. C., Bolan, S., ... & Kirkham, M. B. (2023). Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Advances in agronomy*, 182, 81-130.
- McDowell, R. W., & Haygarth, P. M. (2024). Reducing phosphorus losses from agricultural land to surface water. *Current Opinion in Biotechnology*, 89, 103181.
- Kodaolu, B., Mohammed, I., Wang, Y., Zhang, T., Audette, Y., & Longstaffe, J. (2024). Assessment of phosphorus status in a calcareous soil receiving long-term application of chemical fertilizer and different forms of swine manures (Vol. 53, No. 1, pp. 112-122).
- Lu, Z., Liu, J., Zhu, Y., Wang, Y., & Huang, C. (2024). The Effects of Ammonium Phosphate with Different Sulfur Additions on Crop Yield and Nutrient Uptake in Calcareous Soil. *Agronomy*, 14(6), 1145.
- Rout, S., Abhilash, Meshram, P., & Zhang, P. (2024). A comprehensive review on occurrence and processing of phosphate rock based resources-focus on REEs. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 45(4), 368-388.
- Wahba, M., Fawkia, L. A. B. I. B., & Zaghloul, A. (2019). Management of calcareous soils in arid region. *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 2(5), 248-258.

ATENTAMENTE



DRA. MARI CARMEN LÓPEZ PÉREZ
Responsable del proyecto

ANEXOS



Figura 9 anexo. Inicio del desarrollo del proyecto. Laboreo del suelo calcáreo en parcela de producción del municipio El Recodo, Navojoa, Sonora, México (27.069142-N, -109.512600-W).



Figura 10 anexo. Riego de la parcela previo a la siembra de los cultivos.



Figura 11 anexo. Desarrollo del cultivo de trigo tratado con diferentes fuentes de fertilizantes de P.



Figura 12 anexo. Desarrollo del cultivo de cártamo tratado con diversas fuentes de fertilizantes de P.



Figura 13 anexo. Medición de variables de los cultivos de cártamo y trigo tratado con diversas fuentes de fertilizantes de P.