

Scientific registration n°: 1857

Symposium n°:13B

Presentation: poster

# **Localización del fertilizante fosfatado y la nutrición de plántulas**

## **Fertilisation phosphatée localisée et nutrition des plantules**

### **Phosphate fertilizer placement and seedling nutrition**

**ALVAREZ-SÁNCHEZ E. (1), ETCHEVERS B. J. D. (2), ORTIZ C. Joaquín (3)**

(1) Universidad Autónoma Chapingo, Depto. de Suelos , Chapingo, México, México

(2, 3) Colegio de Postgraduados, I.R.N., Montecillo, Méx. México.

#### **INTRODUCCION**

La disponibilidad de P en la solución del suelo es generalmente baja, lo cual afecta el desarrollo de la plantas. Este fenómeno es consecuencia de reacciones de adsorción del P con algunos constituyentes del suelo, lo cual hace que la difusión hacia las raíces de las plantas sea lenta (Radin y Lynch, 1994). La localización de los fertilizantes fosfatados viene a resolver, en parte, el problema de la disponibilidad, provocando un aumento de la accesibilidad de este elemento a las raíces de los cultivos particularmente durante los primeros días de desarrollo, cuando el sistema radical es incipiente. El beneficio relativo que se obtiene al aplicar el P localizadamente, está condicionado por la capacidad de adsorción de P por el suelo (Barber, 1977; Radin y Lynch, 1994), la concentración de P disponible (Peterson *et al.*, 1981; Soltanpour *et al.*, 1989) y la especie vegetal .

Las especies vegetales difieren en su habilidad para absorber P, la cual depende de la cantidad de P disponible en el suelo y de la capacidad del sistema radical para adquirirlo y acumularlo en la parte aérea. La superficie y la densidad radicales son características estrechamente relacionadas con la eficiencia del cultivo para absorber P (Loneragan y Asher, 1967) y específicamente con el tipo de sistema radical. Cultivos con sistema radical limitado muestran mayor respuesta con el fertilizante aplicado cerca de la semilla que aquéllos con un sistema radical extensivo, particularmente en suelos con baja concentración de P disponible (Rodríguez, 1993). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la posición del fertilizante fosfatado sobre la producción de biomasa, la absorción de P y características de la raíz durante los primeros días de crecimiento de dos cultivos con sistemas radicales contrastantes.

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se condujo un experimento en condiciones de invernadero. Se prepararon dos series de cajas (30x30x11.5 cm), que se llenaron con 7 y 5.8 kg, respectivamente, de un Andisol

migajón arenoso (P-Olsen 7.8 mg kg<sup>-1</sup> y pH de 6.4). La primera serie se sembró con maíz y la segunda con papa.

Los tratamientos ensayados fueron fertilización fosfatada aplicada: a 2, 5 y 8 cm a un lado de la semilla (L); a 2, 5 y 8 cm abajo de la semilla (Pr); incorporado (I) y testigo sin P (T). Las dosis empleadas por caja, para el cultivo de papa y maíz, fueron 0.57 y 0.31 g de P, respectivamente, mismas que se aplicaron como superfosfato simple finamente molido (60 % del fertilizante pasó por malla 100). Los volúmenes de suelo con que se mezcló el fertilizante en los tratamientos de localización lateral, no fueron iguales y dependieron de la distancia de la semilla y se señalan en el Cuadro 1. Cada caja recibió una fertilización basal con N, K y micronutrientes.

Las cajas con 7 kg de suelo se sembraron con maíz *cv.* Batán-92, a razón de dos semillas por caja, y aquellas con 5.8 kg con dos microtubérculos de 1 a 1.5 cm de diámetro aproximadamente *cv.* FL795. Las semillas se colocaron, en ambos casos a 2 cm de profundidad. El peso seco promedio de las semillas de maíz y papa fue de 300 y 122 mg y su porcentaje de P de 0.58 y 0.44 %, respectivamente. Los tratamientos se distribuyeron en el invernadero en un diseño experimental completamente al azar. El número de repeticiones empleadas fueron tres y seis, para maíz y papa, respectivamente.

El maíz y las papas se cosecharon 30 y 34 días después de la germinación. A la cosecha se determinó el peso seco de la parte aérea y el de raíces en la zona fertilizada y sin fertilizar, en las papas el de tubérculos. Además se midió la concentración y el contenido de P en dichos órganos. En las raíces se determinó la longitud (LR), densidad (DR) y superficie radical (SR) (Newman, 1966; Schenk y Barber, 1979). El P aparentemente derivado del fertilizante (PDDF) se estimó mediante el método de la diferencia. Con el P acumulado y la LR se calculó la intensidad de absorción de P.

## RESULTADOS

### Peso seco parte aérea y raíces

La adición de P y el método de aplicación afectaron diferencialmente la acumulación de materia seca en maíz (Cuadro 1). La biomasa total promedio de las plantas con aplicación L (9.26 g planta<sup>-1</sup>) y Pr (8.30 g planta<sup>-1</sup>) de P fue mayor que en el tratamiento con P en I (6.09 g planta<sup>-1</sup>). Los tratamientos con aplicación localizada de P (L y Pr) no difirieron entre sí, pero el P en L sí difirió significativamente del P en I. La mayor biomasa aérea se consiguió cuando el fertilizante se ubicó a 5 cm y a un lado de la semilla, y sólo fue igualado por la colocación en Pr cuando éste se ubicó a 2 cm de la semilla. A los 30 días la aplicación de P había causado 90 % de incremento promedio en la biomasa de la raíz. La mayor biomasa promedio de raíz se consiguió cuando el P se colocó lateralmente (3.5 g planta<sup>-1</sup>), mientras que cuando se aplicó en Pr o en I ésta fue inferior y prácticamente igual en ambos casos (2.80 y 2.54 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente). El efecto del modo de localización del P en esta variable dependió de la distancia de aplicación respecto de la semilla.

La biomasa de raíz disminuyó en la medida que esa distancia aumentaba en el caso del P aplicado en Pr. El efecto contrario se observó en los tratamientos en L, esto debido a que la concentración de P en el volumen de suelo fertilizado aumentó a medida que la distancia de aplicación desde la semilla fue mayor.

Las plantas de papa respondieron después de 34 días positiva y significativamente a la adición de P, sin embargo, los métodos de aplicación de P no provocaron diferencias significativas en la biomasa total (parte aérea+tubérculo+raíz) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de la aplicación y de los métodos de colocación de P en la producción de biomasa de maíz y papa.

Tratamiento <sup>1</sup>	P-Olsen en el suelo P ppm	Maíz 30 días			P-Olsen en el suelo P ppm	Papa 34 días			
		Total	Aérea	Raíz		Total	Aérea	Tubér.	Raíz
		-----g planta <sup>-1</sup> -----					-----g planta <sup>-1</sup> -----		
T	--	3.43	1.87	1.56	--	0.96	0.53	0.184	0.246
I	35	6.09	3.55	2.54	79	3.89	2.17	0.699	1.031
L-2	240	8.21	5.49	2.72	480	4.41	2.92	0.604	0.885
L-5	343	10.12	6.37	3.75	675	3.81	2.50	0.454	0.863
L-8	445	9.45	5.29	4.16	792	4.27	2.92	0.473	0.884
Media	--	9.26	5.72	3.54	--	4.16	2.78	0.510	0.877
Pr-2	120	9.60	6.17	3.43	238	4.80	2.96	0.960	0.886
Pr-5	120	8.69	5.90	2.79	238	3.06	2.06	0.398	0.602
Pr-8	120	6.57	4.38	2.19	238	4.35	2.68	0.622	1.053
Media	--	8.30	5.48	2.80	--	4.07	2.57	0.660	0.847
Prob. F	--	0.006	0.002	0.02	--	0.003	0.0003	0.258	0.004
<sup>2</sup> DMS1	--	3.2	1.9	1.4	--	1.8	1.02	0.569	0.40
DMS2	--	2.6	1.6	1.1	--	1.48	0.83	0.464	0.32
DMS3	--	1.8	1.1	0.8	--	1.05	0.59	0.328	0.23
DMS4	--	5.17	3.14	2.29	--	2.86	1.61	0.8992	0.628

<sup>1</sup> L-2, L-5, L-8 y Pr-2, Pr-5, Pr-8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente; T=testigo; I=incorporado.

<sup>2</sup> DMS1 para comparar T vs I, DMS2 para comparar T o I vs. L o Pr, DMS3 para comparar L vs. Pr, DMS4 para cualquier comparación entre tratamientos.

La biomasa aérea experimentó un incremento significativo cuando se fertilizó con P (1.970 g planta<sup>-1</sup>), pero el método de aplicación no influyó en dicho aumento. Se observó una tendencia aunque no significativa, a que el incremento fuese mayor cuando el P se aplicó en forma localizada (2.7 g planta<sup>-1</sup>) y a que el P localizado lateralmente produjese mayor acumulación de materia seca en la parte aérea (2.78 g planta<sup>-1</sup>) que el localizado en Pr (2.57 g planta<sup>-1</sup>). La distancia de colocación del P respecto de la semilla, tanto en las aplicaciones en L como en Pr no pareció ser un factor importante en la producción de la parte aérea, aunque, en general, con la ubicación de P a 2 cm lateralmente o en profundidad (2.92 y 2.96 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente) se obtuvieron producciones más elevadas.

El método de aplicación no ejerció un efecto significativo en la biomasa de tubérculos, sin embargo, la aplicación L de P produjo tubérculos de menor biomasa (0.510 g planta<sup>-1</sup>) que en Pr (0.660 g planta<sup>-1</sup>). La mayor biomasa de tubérculo se consiguió con la colocación de P en Pr y a una distancia no mayor que 2 cm (0.960 g planta<sup>-1</sup>) y, aunque el efecto no fue significativo, esto representó un incremento de 59 % respecto de la colocación a la misma distancia pero lateralmente y de 37 % respecto del P en I. Este resultado podría indicar que las raíces crecieron inicialmente en esa dirección y que fueron más activas en la absorción de P una vez que alcanzaron la banda del fertilizante.

La biomasa total de raíz, se incrementó por la adición de P en cualquiera de las formas de aplicación utilizadas, y a pesar de que no hubo diferencias significativas entre ellas, la

denominada I produjo la mayor biomasa de raíz (1.030 g planta<sup>-1</sup>) lo que representó un incremento de 319 % respecto del testigo sin P.

### Absorción de P

El P total acumulado en las plantas (parte aérea + raíz) se incrementó significativamente con la adición de P respecto del testigo (Cuadro 2). La acumulación en los tratamientos con P fue 2.8 veces mayor que la del testigo sin P (196  $\mu\text{mol P planta}^{-1}$ ). Las mayores acumulaciones de P se consiguieron con las aplicaciones localizadas (642  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ), las que fueron significativamente superiores (1.7 veces), al acumulado en el tratamiento P incorporado.

Cuadro 2. Efecto de la aplicación y de los métodos de colocación de P en los parámetros del cultivo de papa evaluados a 34 días después de la germinación.

Tratamiento <sup>1</sup>	Maíz 30 días				Papa 34 días				
	P Acumulado			P	P Acumulado			P	
	Total	Aérea	Raíz	DDF	Total	Aérea	Tubér.	Raíz	DDF
	$\mu\text{mol maceta}^{-1}$			%	$\mu\text{mol maceta}^{-1}$			%	
T	196	115	81	0	51	28	9	14	0
I	373	241	132	48	332	206	52	74	85
L-2	609	474	135	68	559	391	77	92	91
L-5	709	527	182	72	540	383	58	100	91
L-8	574	387	187	66	551	406	59	87	91
Media	631	463	168	69	550	393	65	93	91
Pr-2	734	547	187	73	511	335	95	82	90
Pr-5	737	587	150	74	361	254	42	65	86
Pr-8	488	387	101	60	487	330	63	93	90
Media	653	507	146	69	453	306	67	80	89
Prob. F	0.001	0.0006	0.02	--	0.0001	0.0001	0.134	0.0002	--
<sup>2</sup> DMS1	229.6	183.4	65.7	--	184.5	115.9	55.0	33.7	--
DMS2	187.5	149.7	53.7	--	150.6	94.6	44.9	27.5	--
DMS3	132.6	105.9	37.9	--	106.5	66.9	31.8	19.5	--
DMS4	375.0	299.4	07.3	--	291.81	183.3	87.0	53.30	--

<sup>1</sup> L-2, L-5, L-8 y Pr-2, Pr-5, Pr-8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente.

<sup>2</sup> DMS1 para comparar T vs I, DMS2 para comparar T o I vs. L o Pr, DMS3 para comparar L vs. Pr, DMS4 para cualquier comparación entre tratamientos.

El P localizado, ya sea en Pr o en L causó mayor acumulación de P en la parte aérea del maíz (507 y 463  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ , respectivamente) que el I (241  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ). Ello fue el resultado de las mayores concentraciones de P disponible en el suelo (P-Olsen) que ocurrieron al localizar el fertilizante fosfatado en un menor volumen que cuando éste se incorporó, lo cual incrementó la tasa de difusión de P desde el suelo hacia las raíces de las plantas (Claassen y Barber, 1976). La mayor acumulación de P en los tratamientos de localización, se produjo cuando este elemento se aplicó abajo de la semilla, ya sea a 2 ó 5 cm de distancia. A 8 cm de distancia, en ambos métodos (L y Pr), se produjo la misma acumulación de P. Este resultado muestra que con las aplicaciones de P en Pr a 5 y 8 cm de la semilla, la planta acumuló P en la parte aérea el cual no fue utilizado en la conversión de carbono a materia seca.

El P acumulado en la raíz también se incrementó con la adición de P, con relación al testigo sin P. El P acumulado en la raíz, promedio de todos los tratamientos, fue de 81  $\mu\text{mol}$

planta<sup>-1</sup> en el testigo sin P y de 149  $\mu\text{mol planta}^{-1}$  como promedio de los tratamientos con P. No se presentaron diferencias significativas entre los métodos de aplicación.

En esta etapa de crecimiento, 68% del P acumulado por las plántulas del maíz se derivó del fertilizante.

El P total acumulado en las plantas de papa a los 34 días se incrementó significativamente (771 %), por la adición de P, respecto del testigo sin P (Cuadro 2). Ello indica que la respuesta del cultivo de la papa a este nutrimento es considerable.

La aplicación de P en forma localizada produjo las mayores acumulaciones de este elemento en las plantas. En promedio, en los tratamientos indicados se acumuló 502  $\mu\text{mol planta}^{-1}$  de P, esto fue 51 % más que cuando el P se incorporó (332  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ). Sin embargo, sólo el P acumulado por las plantas de los tratamientos con aplicación L de P fueron significativamente mayores que los con P incorporado, pero no se observaron diferencias significativas entre los métodos de localización.

El P acumulado en la parte aérea de la planta también se incrementó significativamente por las adiciones de P al suelo, con relación al testigo sin P. Este incremento, promedio de las aplicaciones de P en forma localizada, fue 1136 % y 626 % cuando el P se incorporó. La localización L de P causó las mayores acumulaciones de este elemento en la parte aérea (393  $\mu\text{mol P planta}^{-1}$ ), valor que fue significativamente superior a los tratamientos con P aplicado en Pr (306  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ) y P en I (206  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ). La distancia de colocación del fertilizante fosfatado respecto de la semilla, ya sea L o en Pr, no afectó significativamente el P acumulado.

En los tubérculos, este parámetro también se incrementó significativamente con las adiciones de P, pero la tendencia fue opuesta a lo observado en la parte aérea, esto es, tendió a ser ligeramente mayor en Pr (67  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ) que en L (65  $\mu\text{mol planta}^{-1}$ ).

Del total de P acumulado por la planta de papa a los 34 días de crecimiento, 90% se derivó del fertilizante, mostrando la alta dependencia que tiene este cultivo del fertilizante fosfatado.

### **Características de la raíz e intensidad de absorción de P**

El crecimiento radical del maíz y la papa resultó en un incremento debido a la adición de P (Cuadro 3). Este efecto se manifestó en forma considerable en la DR. En promedio, la DR del maíz y la papa en las fracciones de suelo fertilizadas con P, aumentó en 70 y 87 % respectivamente, en relación a los testigos. Asimismo, la DR media del maíz (4.7  $\text{cm cm}^{-3}$ ) fue superior que en papa (3.1  $\text{cm cm}^{-3}$ ). El incremento en la LR y SR por la adición de P en maíz y papa fue menor a 26 %, sin mayores diferencias entre ambos cultivos.

Cuadro 3. Efecto del método de aplicación del P en la intensidad de absorción de P del maíz y la papa y características radicales de estos en la fracción fertilizada con P.

Tratamiento <sup>1</sup>	Longitud radical		Superficie radical		Densidad radical		Intensidad de absorción de P	
	maíz	papa	maíz	papa	maíz	papa	maíz	papa
	--cm g <sup>-1</sup> raíz--		cm <sup>2</sup> . g <sup>-1</sup> raíz		----cm cm <sup>-3</sup> ----		μmol cm <sup>-1</sup> de P	
T	6099	8010	1079	1316	1.4	0.4	--	--
I	9519	6855	1393	1151	3.6	1.9	0.0097	0.0418
L-2	9499	11066	1384	1535	4.8	3.5	0.0289	0.1065
L-5	8875	12400	1326	1641	4.8	4.5	0.0276	0.0857
L-8	10097	10221	1532	1572	7.0	4.5	0.0148	0.1112
Pr-2	8624	10025	1312	1352	4.9	2.7	0.0236	0.0784
Pr-5	8728	11447	1349	1561	4.8	2.2	0.0336	0.0784
Pr-8	6688	8381	1182	1253	2.9	2.7	0.0229	0.0702
<i>P&gt;F</i>	0.05	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	0.013	<0.01
<i>DMS</i>	4172	3629	413	426	3.6	1.9	0.0209	0.035

<sup>1</sup> L-2, L-5, L-8 y Pr-2, Pr-5, Pr-8, aplicación lateral y profunda a 2, 5 y 8 cm de la semilla, respectivamente; T=testigo; I=incorporado.

Para obtener la máxima producción de biomasa aérea de maíz a los 30 días (6.2 g planta<sup>-1</sup>, ver Cuadro 1), se requirió un mínimo de 120 ppm de P-Olsen en el suelo. Para esta demanda, la planta tuvo que desarrollar intensidades de absorción de 0.024 μmol de P cm<sup>-1</sup> [ 30 días ]. Los tratamientos que cubrieron estos requerimientos de la planta fueron las localizaciones en Pr a 2 y 5 cm, que proporcionaron 120 ppm de P disponible en el suelo y el L a 5 cm de distancia de la semilla, en el que la concentración de P en el volumen de suelo fertilizado se elevó a 343 ppm de P.

En la papa, la intensidad de absorción mínima asociada con la máxima producción de materia seca (4.8 g planta<sup>-1</sup>, ver Cuadro 1) fue aproximadamente (0.08 μmol de P cm<sup>-1</sup> [ 34 días ], la que se consiguió cuando el P se colocó en Pr a 2 cm de la semilla.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran que el cultivo de maíz y papa respondieron a las aplicaciones de P desde una edad temprana. Esta respuesta se reflejó en un incremento en la biomasa y el P acumulado en los distintos órganos de la planta en ambos cultivos.

Tanto en maíz como en papa, la aplicación localizada de P provocó una mayor acumulación de este elemento en la planta que cuando el P se incorporó con el suelo. Este comportamiento era esperado porque la aplicación localizada del fertilizante fosfatado había resultado en mayores concentraciones de P-Olsen que su incorporación en el mismo. Las investigaciones realizadas en este campo señalan que efectivamente los cultivos usan más eficientemente el P del fertilizante cuando éste se mezcla con pequeños volúmenes de suelos cercanos a la semilla, que cuando espolvoreado y mezclado con volúmenes mayores de suelo en la zona de exploración radical, aunque los resultados anteriores se limitan a observaciones hechas a suelos con bajos contenidos de P y moderadas dosis de aplicación con P (Borkert y Barber, 1985; Lu y Miller, 1993).

En el cultivo de maíz la mayor acumulación de materia seca y P en la parte aérea se produjo cuando el P se aplicó localizadamente abajo de la semilla. En el caso de la papa, las

mayores cantidades de biomasa y P acumulado en la parte aérea ocurrieron cuando la aplicación de P se hizo localizadamente, pero a un lado de la semilla. Sin embargo, la localización de P en profundidad fue la que provocó la mayor biomasa de tubérculo y de P acumulado en este órgano. Este comportamiento mostró que a pesar de que con las aplicaciones de P en forma lateral se logró una concentración de P-Olsen en el suelo más de dos veces superior que aquéllas obtenidas con la aplicación en profundidad, no condujeron a igualar la eficiente translocación de fotosintatos y P al tubérculo conseguidas con las localizaciones de P en profundidad; esto señala la importancia de una adecuada colocación del fertilizante fosfatado en este cultivo en particular, en que tempranamente se inicia la formación de un órgano de demanda, en especial por P con repercusión en el rendimiento final.

La máxima producción de biomasa aérea de maíz pudo obtenerse con una disponibilidad de P en el suelo dos veces inferior a la que se necesita para alcanzar igual condición en la papa. Esta menor necesidad de P disponible en el suelo se explica, en parte, por el mayor desarrollo radical que presenta el primer cultivo. La densidad radical del maíz fue, en general, superior a la de la papa. Esta condición hace que el maíz desarrolle eficiencias de absorción de P (esto es  $\mu\text{moles de P}$  que un cultivo puede absorber por cada ppm de P-Olsen en el suelo) mayores que la papa. La papa a su vez, desarrolló intensidades de absorción ( $0.08 \mu\text{moles P cm}^{-1}$  [30 días] ) superiores a la del maíz ( $0.027 \mu\text{moles P cm}^{-1}$  [30 días] ) para compensar su menor densidad radical.

Los resultados anteriores permiten entender mejor las diferencias en necesidades de P y eficiencia de absorción de este elemento durante la etapa inicial de desarrollo, en cultivos con sistemas radicales contrastantes como lo son la papa y el maíz.

#### **Agradecimientos**

Al Instituto del Fósforo y la Potasa por el financiamiento parcial recibido para la presente investigación.

#### **LITERATURA CITADA**

- Borkert, C. M., and S. A. Barber. 1985. Predicting the most efficient phosphorus placement for soybeans. *Soil Sci. Soc. Am. J* 49: 901-904.
- Claasen, N., and S. A. Barber. 1976. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant root system. *Agron. J.* 68:961-964.
- Loneragan, J.F., and C.J. Asher. 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture: II. rate of phosphate absorption and its relation to growth. *Soil Sci.* 103:311-318.
- Lu, S., and M. H. Miller. 1993. Determination of the most efficient phosphorus placement for field-grown maize in early growth stages. *Can. J. Soil Sci.* 73:349-358.
- Peterson, G. A., D. H. Sander, P. H. Grabouski, and M. L. Hooke. 1981. A new look at row and broadcast-P recommendation for winter wheat. *Agron. J.* 73: 13-17.
- Radin, J.W., and J. Lynch. 1994. Nutritional limitations to yield: alternatives to fertilization. In: American Society of Agronomy, Crop Science, Society of American Soil Science Society of America (eds.) *Physiology and determination of crop yield*, p277-283. Madison, Wisconsin, USA.
- Rodríguez S., J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Schenk, H. K., and S. A. Barber. 1979. Root characteristics of corn genotypes as related to phosphorus uptake. *Agron. J.* 71: 921-924.

Soltanpour, P. N., M. Gharous, A. Azzaoui, and M. Abdelmonem. 1989. Response of dryland wheat to P rates and placement methods. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 20: 597-605.

Palabras clave: maíz, papa, longitud radical, superficie radical, densidad radical, intensidad de absorción de P, P acumulado

Mots clés : maïs, pomme de terre, longueur des racines, densité des racines, surface racinaire, prélèvement de P

Key words: corn, potato, root length, root density, root surface, P uptake intensity, P uptake