

EVALUACIÓN DE LA FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO EN LECHUGA *Lactuca sativa* L., EN EL ALTIPLANO DE PASTO, NARIÑO.

EVALUATION OF PHOSPHORUS FERTILIZATION ON LETTUCE *Lactuca sativa* L., IN THE HIGHLAND PASTO, NARIÑO.¹

Sofía Margarita Bravo E.² James Andrés Paspur C.² Alberto Unigarro S.³ Juan Felipe España T.⁴

RESUMEN

Las hortalizas son un producto básico en la alimentación de la población de las zonas frías de Colombia. En el departamento de Nariño su cultivo se desarrolla, entre otros, en suelos derivados de ceniza volcánica los que presentan una alta tasa de fijación de fósforo, por lo que es conveniente buscar estrategias de manejo que mejoren su disponibilidad, disminuyan los costos de producción y aumenten los rendimientos. En dos suelos derivados de cenizas volcánicas (Vitric Haplustand) del altiplano de Pasto (2800 m.s.n.m), se evaluó el rendimiento del cultivo de lechuga *Lactuca sativa* L; variedad Coolguard MI a la aplicación de fosfato diamónico (DAP 18-46-0), fosfato monoamónico (MAP 10-50-0) y fosfato monoamónico-AVAIL (MAP-AVAIL 10-50-0) recubierto con maleico itacónico copolimero; en dosis de 0, 50, 100 y 150 kg P₂O₅ ha⁻¹. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial combinatorio. Se evaluó la mejor alternativa de fertilización y se hizo el análisis económico de presupuesto parcial para el rendimiento total.

El diámetro de la cabeza al igual que el rendimiento estuvieron afectados por las fuentes de fósforo aplicadas; el peso de la materia seca se vio afectado por la fuente y la dosis

¹ Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Agrónomo. 2009

² Estudiante de Ingeniería Agronómica, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas. Pasto, Colombia. E-mail: sofia_bravoeraso@hotmail.com; pazcal3@yahoo.es

³ Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Profesor catedrático. Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas. Pasto, Colombia. E-mail: unilab@udenar.edu.co

⁴ Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Representante Monómeros Colombo – Venezolanos EMA. E-mail: JEspana@monomeros.com.co

de fósforo. Se encontró un efecto favorable en las variables evaluadas con la aplicación de MAP- AVAIL en dosis de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹. Al realizar el análisis económico del rendimiento se encontró una tasa de retorno marginal superior al 80% cuando se fertilizó con DAP y MAP en dosis de 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ y MAP- AVAIL en dosis de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹.

Palabras clave: análisis económico, rendimiento, MAP-AVAIL, DAP, fijación.

ABSTRACT

Vegetables are a staple in the diet of people in cold areas of Colombia. In the department of Nariño their crop develops, among others, in soils derived from volcanic ash which have a high rate of fixation of phosphorus, making it convenient for management strategies that improve availability, reduce production costs and increase yields. In two soils derived from volcanic ash (Vitric Haplustand) Pasto highland (2800 m), was evaluated the yield of the crop of lettuce *Lactuca sativa* L; variety Coolguard MI to the implementation of diammonium phosphate (DAP 18-46-0), monoammonium phosphate (MAP 10-50-0), and monoammonium phosphate-AVAIL (MAP-AVAIL 10-50-0) maleic itaconic copolymer coated in doses; of 0, 50, 100 and 150 kg P₂O₅ ha⁻¹. By using a randomized complete block with factorial combination. Was evaluated the best alternative fertilization and there was partial budget economic analysis for overall yield.

The diameter of the head as well as yield were affected by sources of phosphorus applied, the weight of dry matter was affected by the source and dose of phosphorus. Was found a favorable effect on the variables evaluated with the application of MAP-AVAIL at doses of 50 kg P₂O₅ ha⁻¹. The economic analysis of yield showed that a marginal rate of return exceeding 80% was obtained when fertilized with DAP and MAP at doses of 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ and MAP-AVAIL in doses of 50 kg P₂O₅ ha⁻¹.

Key words: economic analysis, yield, MAP-AVAIL, DAP, fixation.

INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos asciende a un valor cercano al 20% del costo total de la producción, debido entre otros, al incremento en el precio del fertilizante del 40% en los dos últimos años; de los tres macronutrientes N-P-K, el fósforo es el más costoso y es necesario aplicar cerca de 10 veces más del nutriente para satisfacer los requerimientos del cultivo (Amadeo, 2008). De igual forma, este autor manifiesta que, en Colombia, hasta el 90% del fósforo está fijado o retenido en el suelo, en consecuencia, a los pocos días de su aplicación se transforma en formas no accesibles para el sistema radicular, provocando grandes pérdidas del nutriente y elevando drásticamente los costos de producción. Estudios a escala mundial, han demostrado que en suelos ácidos (Andisoles, Alfisoles, Oxisoles y Ultisoles), ocurre con frecuencia este fenómeno.

Nariño es considerado el departamento productor de hortalizas más importante del suroccidente colombiano, sobresaliendo en la producción de repollo, zanahoria, cebolla y lechuga. Los municipios con mayor área sembrada para el cultivo de lechuga son Pasto (70 has) y Potosí (55 has), con un rendimiento promedio de 35000 kg ha⁻¹ y una producción para el departamento de 15170 ton año⁻¹ (Consolidado Agropecuario de Nariño, 2005).

En el departamento de Nariño, la mayor parte de sus suelos están dominados por rocas eruptivas modernas que provienen de la actividad volcánica de fines del terciario hasta nuestros días (Blasco, 1969); es una región netamente agropecuaria del sur de Colombia y tiene en más de un 50%, suelos derivados de cenizas volcánicas (Gamboa, 1972). Una de las características más importantes de los suelos derivados de cenizas volcánicas, es su capacidad para adsorber (fijar) fósforo (P) en la superficie de los minerales amorfos. Esta es la principal limitante química de los Andisoles. Aparentemente, la capacidad de fijación de P varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez cambia el efecto residual de las aplicaciones de fosfato. En ciertos cultivos, los estudios de calibración no han logrado correlacionar adecuadamente el contenido de P en el suelo con las recomendaciones de fertilización (Espinosa, 1998).

Los suelos Andisoles en más del 60% de los primeros 60 cm presentan formación de complejos Al-humus, presencia de una mineralogía de arcillas dominada por alófono e imogolita, las cuales forman un complejo arcillo- humico muy estable, además de presentar carga variable, la cual esta asociada a una alta retención de fosfatos y otras moléculas orgánicas (Gonzáles, 2003).

Fassbender (1970), en cinco suelos ándicos de Costa Rica, encontró que la fracción fijada en forma soluble en NH_4Cl que representa la adsorción, llegó en promedio al 2,95% del fósforo total fijado; la fracción retenida como fosfato de calcio fue del orden de 1,64% y la de los fosfatos de aluminio alcanzaron en promedio 85,56%, siguiendo en importancia la fracción del fósforo unida al hierro que llegó en promedio al 14,40%. Resultados similares a éstos se encontraron en suelos ándicos del departamento de Nariño por Benavides (1987), en los cuales la cantidad de fósforo adsorbido fue bajo en comparación con las formas menos solubles; el mayor porcentaje de fósforo retenido por uno de los suelos ándicos típicos de la región de Pasto en el que se realizó el fraccionamiento, se encontró como fosfato de aluminio. En los mismos suelos de Nariño se obtuvieron interrelaciones entre la cantidad de fósforo fijado y algunos parámetros como el pH del suelo, y los porcentajes de materia orgánica y material amorfo.

Burbano y Cabrera (1971) encontraron que la capacidad de fijación de fosfatos en suelos de cuatro áreas volcánicas, correspondientes a los volcanes Galeras, Doña Juana, Cumbal y Puracé; es muy marcada, fijando el 97,53% del fósforo añadido. De la fijación total, el 45,17% correspondió a adsorción, mientras que el 54,81% se asoció con precipitación. Los mismos autores manifiestan que los fosfatos de hierro constituyeron la forma más importante de precipitación, mientras que la precipitación hacia los fosfatos de aluminio, contrario a lo encontrado en suelos volcánicos de otras áreas, fue nula.

La SFP (Specialty Fertilizer Products, 2005), manifiesta que el recubrimiento del fertilizante portador de fósforo con la molécula AVAIL (40% de maleico itacónico copolimero) en proporción de 1.2 litro por tonelada métrica del fertilizante, reduce la

fijación del fósforo en el suelo hasta en un 80% debido a que el polímero al tener una alta capacidad de intercambio cationico (cerca a $1800 \text{ cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) al entrar en contacto con el suelo, precipita cationes de calcio, magnesio, hierro y aluminio (Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} Al^{+++}), razón por la cual disminuye la interacción de estos elementos con el fósforo.

La misma compañía manifiesta que en ensayos realizados en cultivos de trigo, soya, maíz, cebolla y remolacha azucarera con MAP –AVAIL, en suelos de Estados Unidos, se obtuvieron incrementos cercanos al 15% en el rendimiento.

Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue la evaluación de tres fuentes de fósforo (DAP, MAP y MAP – AVAIL) aplicadas en cuatro dosis (0, 50, 100 y 150 kg de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en dos localidades del municipio de Pasto (Chávez y Gualmatán) sobre el rendimiento y sus componentes en el cultivo de lechuga *Lactuca sativa* L. var. Coolguard MI.

METODOLOGÍA

La investigación se realizó en dos suelos del municipio de Pasto, en el corregimiento de Catambuco vereda Chávez, ubicada a $1^{\circ}11'0''\text{N}$ y $77^{\circ}17'0''\text{O}$, 2820 msnm y una temperatura promedio de 12°C ; y el corregimiento de Gualmatán ubicado a $1^{\circ}13'16''\text{N}$ y $77^{\circ}17'2''\text{O}$ a 2800 msnm y una temperatura promedio de 13°C ; estos suelos se clasificaron como Vitric Haplustand (IGAC, 2004).

Se utilizó la variedad de lechuga Coolguard MI de semillas Arroyave, tipo batavia, la cual es tolerante a bajas temperaturas, presenta cabezas compactas, grandes y uniformes, es tolerante a mildew y esclerotinia, se adapta a suelos que van desde el franco arcilloso al franco limoso, y con una madurez de cosecha de 80 a 85 días (Semillas Arroyave, 2003).

Las plántulas de lechuga de un mes de desarrollo, se transplantaron el 18 de febrero del 2009 en cada localidad, para lo cual se utilizó un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial combinatorio de 2 X 3 X 4; se trazaron cuatro bloques, cada uno con un área de 360 m² (1.2 m X 30 m), dentro de cada repetición se trazó doce unidades experimentales cada una con un área de 3 m² (1.2 m X 2.5 m) la distancia entre bloques y calles fue de 0.5 metros; cada unidad experimental estuvo conformada por 40 plantas sembradas a 0.25 m entre sitios, y 0.30 m entre surcos (10 plantas por surco y 4 surcos por unidad experimental). El área útil fue de 0.9 m², con 12 plantas por unidad experimental.

Se evaluó tres fuentes de fósforo: DAP (fosfato diamónico, 18 – 46 – 0), MAP (fosfato monoamónico, 10 – 50 – 0) y MAP-AVAIL (fosfato monoamónico, 10 – 50 – 0, recubierto con maléico itacónico copolímero), aplicadas en cuatro dosis (0, 50, 100 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹), para 12 tratamientos, en cada localidad.

Adicionalmente a la aplicación de fósforo, se preparó una mezcla con nitrógeno, potasio, magnesio, azufre, boro y zinc, según el análisis de suelo y los requerimientos del cultivo; se utilizó como fuente de nutrientes urea, cloruro de potasio, sulfato de magnesio, bórax y sulfato de zinc. La fertilización se realizó 15 días después del trasplante, se aplicó la mezcla en forma de corona y se tapó con una escardada superficial (Osorio, 1992; Castro, 1998).

La preparación del suelo se efectuó mediante una arada y una rastrillada, posteriormente se desinfectó el suelo con agrodyne en dosis de 20 cc bomba de 20 L⁻¹. Se llevó a cabo un riego ligero después del trasplante y se dispersó gránulos de metaldehído en horas de la tarde para el control de babosas *Milax sp.*

El control de arvenses se hizo de forma manual, la primera desyerba se llevó a cabo 15 días después del trasplante, coincidiendo con la aplicación del fertilizante, de ahí se realizó una segunda desyerba a los 15 días (Salunkhe y Kadam, 2004).

El manejo de enfermedades (mildeo *Bremia lactucae* y pudrición de la cabeza *Sclerotinia sclerotiorum*), se hizo de forma preventiva aplicando semanalmente mancozeb en dosis de 100 g bomba de 20 L⁻¹ (Avila y Velandia, 1992). Para el control de *Sclerotinia sclerotiorum*, se aplicó validacim en dosis de 20 cc bomba de 20 L⁻¹ 18 días antes de la cosecha. Para el control de tierreros *Agrotis ipsilon*, se aplicó quincenalmente clorpirifós en dosis de 25 cc bomba de 20 L⁻¹.

La evaluación se realizó 12 semanas después del transplante. Se cosecharon las 12 lechugas del área útil cuando éstas habían compactado su cabeza (Sañudo *et al.*, 2002), se cortaron a ras del suelo, se pesó cada una utilizando una balanza analítica y posteriormente se transformó el rendimiento a toneladas por hectárea.

Una vez pesadas las lechugas se procedió a medir su perímetro (contorno de la cabeza) con un metro, y se calculó el diámetro por medio de la siguiente ecuación:

$D = C/\pi$, donde:

D= diámetro

C= contorno de la cabeza

$\pi = 3,14159265$

Para evaluar el contenido de materia seca, las lechugas evaluadas se empacaron en bolsas de papel, se llevaron a secar a 65 °C por 72 horas, y posteriormente se pesaron.

Con los datos obtenidos, se realizó el análisis de varianza; para aquellas variables que presentaron diferencias estadísticas significativas se efectuó la prueba de comparación de promedios de Tukey. Para el análisis económico se utilizó la metodología del presupuesto parcial, se tuvo en cuenta el cálculo del rendimiento promedio, estimación del precio de campo de cada insumo, estimación del costo variable y el beneficio neto. (Perrin *et. al.*, 1976). La evaluación económica se hizo con los tratamientos que presentaron diferencias estadísticas significativas, seleccionando dentro de cada fuente el tratamiento de menor costo variable; para los tratamientos que no recibieron

fertilización con fósforo (testigo), se sacó un promedio, ya que éstos presentaron el mismo costo variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) para las fuentes de fósforo en la variable materia seca; además, se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) para las dosis y la interacción fuente por dosis en las variables: rendimiento, materia seca y diámetro de cabeza (tabla 1).

Tabla 1. Análisis de varianza para el rendimiento (ton ha^{-1}), materia seca (g planta^{-1}) y diámetro de la cabeza (cm planta^{-1}) de lechuga *Lactuca sativa* L., obtenidos en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño.

FV	GL	CUADRADOS MEDIOS		
		RENDIMIENTO	MATERIA SECA	DIÁMETRO DE LA CABEZA
Localidad	1	1,09 ns	0,34 ns	0,18 ns
Fuente	2	50,56 ns	80,41 **	0,15 ns
Dosis	3	1599,85 **	527,74**	6,66 **
Localidad*Fuente	2	7,68 ns	4,35 ns	0,35 ns
Localidad*Dosis	3	7,22 ns	2,59 ns	0,6 ns
Fuente*Dosis	6	138,67 *	47,95 **	2,78 **
Localidad*Fuente*Dosis	6	12,82 ns	1,78ns	0,30 ns
Error	69	48,42	10,43	0,57
C.V		11,19	15,58	4,55

** Altamente significativo ($p < 0.01$)

* Significativo ($p < 0.05$)

ns: no significativo

Diámetro de la cabeza. Al realizar la prueba de comparación de promedios de Tukey (tabla 2) las lechugas fertilizadas con MAP en dosis de $100 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ presentaron un diámetro de la cabeza de $17,82 \text{ cm}$ el cual presentó diferencias estadísticas significativas con el diámetro obtenido con las otras dosis de fertilización ($0, 50$ y $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$). Cuando se fertilizó las lechugas con DAP, el diámetro promedio de las cabezas no presentó diferencias estadísticas significativas respecto a la aplicación de las diferentes dosis. Al aplicar MAP-AVAIL, el diámetro de las cabezas de lechuga obtenidas con dosis de $50, 100$ y $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ presentaron diferencias

estadísticas significativas con el diámetro de las cabezas encontrado cuando no se aplicó fósforo (tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el diámetro de la cabeza (cm planta⁻¹) en lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	FUENTE		
	DAP	MAP	MAP AVAIL
0	16,22 a	16,29 b	15,16 b
50	16,51 a	16,26 b	17,11 a
100	16,88 a	17,82 a	16,8 a
150	16,76 a	16,24 b	16,99 a
Comparador Tukey (p ≤ 0.05)		1,27	

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p < 0.05)

Los resultados indican que la lechuga, en los suelos evaluados, presentó respuesta a la fertilización con fósforo cuando se utilizó MAP y MAP-AVAIL, a diferencia de la fertilización realizada con DAP, posiblemente debido a la reacción ácida que genera el MAP aplicado al suelo, que favorece la disponibilidad del fósforo a la planta. Al respecto Silva *et al.*, (2006) al evaluar la disponibilidad de fósforo utilizando como fuentes MAP y DAP, encontraron que el contenido de fósforo recuperado fue mayor con MAP, requiriendo así una menor dosis de fósforo para aumentar en una unidad la disponibilidad del elemento para un nuevo cultivo. Se pudo observar además el efecto favorable de la aplicación de MAP- AVAIL ya que con dosis bajas (50 kg de P₂O₅ ha⁻¹) se obtuvieron resultados similares en el diámetro de la cabeza que fertilizando con dosis altas (100-150 kg de P₂O₅ ha⁻¹).

Al evaluar estadísticamente el efecto de la dosis de fósforo (0, 50, 100 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹) a través de las tres fuentes (DAP, MAP y MAP-AVAIL), no se observaron diferencias (tabla 3), lo que se pudo deber, como lo manifiesta Guerrero (1998), a que las diferentes fuentes portadoras de fósforo utilizadas, presentan una alta solubilidad lo que conlleva a obtener resultados similares en algunos suelos, como los estudiados.

Tabla 3. Efecto de la aplicación de diferentes dosis y fuentes de fósforo sobre el diámetro de la cabeza (cm planta⁻¹) en lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

FUENTE	DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹			
	0	50	100	150
DAP	16,22 a	16,51 a	16,88 a	16,76 a
MAP	16,29 a	16,26 a	17,82 a	16,24 a
MAP- AVAIL	15,16 a	17,11 a	16,8 a	16,99 a
Comparador Tukey (p≤ 0.05)		1,27		

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p<0.05)

Materia seca. Al realizar la prueba de comparación de promedios de Tukey, se encontró que el peso de la materia seca obtenido al fertilizar con MAP y DAP en dosis de 100 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ presentó diferencias estadísticas significativas con el peso seco obtenido en el testigo (sin adición del fósforo) y con la adición de 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (tabla 4); lo cual se puede atribuir según Pellerin y Mollier (2001) a que el fósforo incrementa el área foliar y en consecuencia hay un aumento en la materia seca al igual que en la oferta de carbohidratos; por su parte Russo y Pappelis (1995), manifiestan que el fósforo incrementa el peso seco de la planta, ya que, este elemento promueve una mayor elongación y producción de pelos radicales, por consiguiente aumenta la superficie de absorción de las plantas y con ello se mejora la nutrición.

Tabla 4. Efecto de la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre la materia seca (g planta⁻¹) en lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	FUENTE		
	DAP	MAP	MAP- AVAIL
0	14,64 b	15 b	14,32 b
50	15,84 b	19,47 b	22,98 a
100	24,16 a	28 a	22,2 a
150	21,09 a	25,33 a	25,66 a
Comparador Tukey (p≤ 0.05)		5,47	

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p<0.05)

Con la aplicación de MAP- AVAIL, el peso de la materia seca obtenido con 50, 100 y 150 kg de P_2O_5 ha^{-1} fue estadísticamente superior al obtenido en el testigo. En esta variable los datos muestran el efecto positivo del MAP- AVAIL, ya que se obtienen resultados similares aplicando 50, 100 y 150 kg de P_2O_5 ha^{-1} ; lo cual parece estar relacionado con el efecto favorable del recubrimiento del fósforo con el polímero el cual disminuye la fijación del elemento y lo hace más disponible para los cultivos (Specialty Fertilizer Products, 2005); en cambio cuando se aplica MAP y DAP, se requieren dosis altas de fósforo (100 y 150 kg de P_2O_5 ha^{-1}) para obtener un incremento significativo en el peso de la materia seca.

El peso de la materia seca de la lechuga fue estadísticamente menor en el testigo (sin adición de fósforo) y cuando se aplicó MAP y DAP con dosis de 50 kg de P_2O_5 ha^{-1} ; lo cual se puede deber a una disminución en el área foliar que afectó el crecimiento de plantas; situación que se reflejó en la reducción de materia seca en las hojas, debido probablemente a la disminución en la concentración de fósforo inorgánico en las hojas y como mecanismos de compensación a las deficiencias de fósforo en el suelo, las plántulas traslocaron carbohidratos a la raíz en detrimento de las hojas, cambiando el balance de la planta en la distribución de materia seca, situación planteada por Roveda y Polo (2007) al evaluar la adaptación del maíz a suelos con bajo fósforo disponible.

Al realizar la prueba de Tukey para el peso de la materia seca de la parte aérea de la lechuga obtenida por las diferentes dosis a través de las fuentes de fosforo (tabla 5), se encontró que cuando se utiliza la dosis de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 el mayor peso de la materia seca se obtiene con MAP-AVAIL, el cual presentó diferencias estadísticas significativas con el peso obtenido cuando se aplicó DAP. Cuando se fertilizó con 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 el peso obtenido con MAP fue estadísticamente superior al obtenido con MAP-AVAIL y cuando se utilizó 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 , el peso de la materia seca de la lechuga fue similar para las tres fuentes de fósforo utilizadas.

Los resultados obtenidos para las dosis de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 indican posiblemente que la disponibilidad de fósforo para la planta esta determinada por una mayor disponibilidad del elemento que se favorece por el recubrimiento del mismo por el

polímero (MAP-AVAIL), a dosis de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ la disponibilidad del elemento depende del grado de acidez generada durante las reacciones químicas que sufren los fertilizantes una vez llegan al suelo que favorecen su disponibilidad y a dosis de 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ , posiblemente no sea el fósforo el elemento limitante, sino otros elementos que no permiten la expresión del potencial de acumulación de materia seca del cultivo (Ley de Liebig).

Tabla 5. Efecto de la aplicación de diferentes dosis y fuentes de fósforo sobre la materia seca (g planta⁻¹) en lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

FUENTE	DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹			
	0	50	100	150
DAP	14,64 a	15,84 b	24,16 ab	21,09 a
MAP	15 a	19,47 ab	28 a	25,33 a
MAP- AVAIL	14,32 a	22,98 a	22,2 b	25,66 a
Comparador Tukey (p≤ 0.05)		5,47		

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p<0.05)

Rendimiento. Al realizar la prueba de comparación de promedios de Tukey para cada una de las fuentes de fósforo aplicadas (tabla 6), se encontró que al fertilizar con MAP el rendimiento más alto se obtuvo cuando se aplicó 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹, el cual presentó diferencias estadísticas significativas con los rendimientos obtenidos al no aplicar fósforo o cuando se aplicó 50 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

Los resultados podrían explicarse por el efecto de la reacción ácida de la fuente (pH en solución al 10% de 3.5 a 4.2, ISQUISA, 2007), generada luego de su hidrólisis en la solución del suelo, condición que se mantiene en el contorno de la raíz, la cual facilita la solubilidad del fosfato y por ende el aprovechamiento por parte de la planta (Schulthess, 2005). Sin embargo, como lo manifiesta éste mismo autor, esta reacción favorece también la solubilización de calcio, magnesio, hierro, aluminio y manganeso, los cuales reaccionan rápidamente con los iones fosfato, adsorbiendo y precipitando el fósforo

soluble, lo cual puede afectar el rendimiento de los cultivos por baja disponibilidad del fósforo.

Tabla 6. Efecto de la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre el rendimiento (ton ha⁻¹) de lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	FUENTE		
	DAP	MAP	AVAIL
0	52,05 b	52,78 b	49,44 b
50	55,38 b	61,26 b	66,01 a
100	68,3 a	74,25 a	68,57 a
150	67,56 a	61,64 b	69,14 a
Comparador Tukey (p ≤ 0.05)		11,79	

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p < 0.05)

Cuando se aplicó DAP (18-46-0) como fuente de P₂O₅, se encontró que el rendimiento más alto se obtuvo con 100 y 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (68.30 y 67.56 ton ha⁻¹) presentando diferencias estadísticas significativas con los rendimientos obtenidos cuando no se aplicó fósforo y cuando se fertilizó con 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ con 52.05 y 55.38 ton ha⁻¹ respectivamente (tabla 6), mostrándose una respuesta positiva a la fertilización fosfórica en dosis de hasta 100 kg ha⁻¹, lo que podría indicar que el elemento limitante para obtener mayores rendimientos ya no es fósforo sino otro(s) elementos, aunque también podría estar relacionado con la reacción básica que genera el DAP (pH en solución al 10% de 7,4 a 8,0) y la solubilidad (58 g 100 ml⁻¹ de agua a 20 °C), que podría estar poniendo en solución una cantidad de fósforo mayor que aquella que puede tomar la planta ya que es necesario que exista en su contorno una condición de acidez, la cual en el caso de DAP es más lenta, y podría perderse parte del fósforo aplicado por otros mecanismos como inmovilización, fijación y precipitación (Tisdale, 1993).

Cuando se aplicó MAP-AVAIL (10-50-0 recubierto con maleico itacónico copolímero), se encontró que los rendimientos más altos (66.01, 68.57 y 69.14 ton ha⁻¹) se obtuvieron con la aplicación de 50, 100 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹ respectivamente, presentando diferencias estadísticas significativas con el rendimiento obtenido sin aplicación de fósforo (tabla 6).

Los resultados encontrados ponen en manifiesto el efecto benéfico que ejerce el polímero que recubre al fertilizante sobre la aprovechabilidad del P, como lo afirma la Specialty Fertilizer Products (2005); ya que con dosis bajas (50 kg de P₂O₅ ha⁻¹), se obtienen resultados similares a la aplicación de 100 y 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

Al comparar el rendimiento obtenido dentro cada dosis para las diferentes fuentes de fósforo (Tabla 7), la prueba de comparación de promedios de Tukey, no mostró diferencias estadísticas significativas lo cual indica que las fuentes (DAP, MAP y MAP AVAIL) presentan igual comportamiento a una misma dosis de aplicación.

Tabla 7. Efecto de la aplicación de diferentes dosis y fuentes de fósforo sobre el rendimiento (ton ha⁻¹) de lechuga *Lactuca sativa* L., obtenido en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño. Prueba de Tukey.

FUENTE	DOSIS kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹			
	0	50	100	150
DAP	52,05 a	55,38 a	68,3 a	67,56 a
MAP	52,78 a	61,26 a	74,25 a	61,64 a
MAP- AVAIL	49,44 a	66,01 a	68,57 a	69,14 a
Comparador Tukey (p≤ 0.05)	11,79			

Promedios con la misma letra no son significativos, Tukey (p<0.05)

Análisis económico. El análisis de presupuesto parcial del rendimiento, se realizó con aquellos tratamientos que presentaron diferencias estadísticas significativas en el análisis de las diferentes fuentes a través de las dosis, dentro de los cuales se escogieron los tratamientos que presentaron los menores costos variables, es decir: MAP-AVAIL con 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹; DAP y MAP con 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹, además, se tuvo en cuenta un promedio de los tratamientos que no recibieron fertilización de fósforo (testigo) (tabla 8). Se encontró que los ingresos netos fluctuaron entre \$35.235.920 y \$50.552.425, con costos variables entre \$1.093.880 y \$1.905.200.

Tabla 8. Costos de producción, rendimiento, beneficio neto y beneficio ajustado para la producción de lechuga *Lactuca sativa* L., obtenidos al evaluar diferentes fuentes y dosis de fósforo en dos suelos derivados de ceniza volcánica del municipio de Pasto, Nariño.

COSTOS VARIABLES	TRATAMIENTOS			
	TESTIGO	MAP 100	DAP 100	MAP-AVAIL 50
Fertilización	260130	671450	657894	503790
Mano de obra	58500	112500	111999	85500
Transporte fertilizante	3900	7500	7470	5700
Transporte cosecha	771350	1113750	1024500	990150
TOTAL COSTOS VARIABLES.	1093880	1905200	1801863	1585140
Producción total (ton ha ⁻¹)	51,42	74,25	68,3	66,01
Producción ajustada real (-10%)	46,28	66,825	61,47	59,409
Ingresos brutos (\$785 kg.)	36329800	52457625	48253950	46636065
BENEFICIO NETO	35235920	50552425	46452087	45050925

El análisis de dominancia (tabla 9) no mostró tratamientos dominados dentro de los mejores rendimientos, porque no se encontró un tratamiento donde su costo variable sea elevado y su beneficio neto sea inferior en comparación a otro.

Tabla 9. Análisis de dominancia para la respuesta a la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo en lechuga *Lactuca sativa* L., en dos suelos derivados de cenizas volcánicas del municipio de Pasto, Nariño.

TRATAMIENTOS	BENEFICIO NETO	COSTOS VARIABLES	
MAP 100	50552425	1905200	ND
DAP 100	46452087	1801863	ND
MAP-AVAIL 50	45050925	1585140	ND
TESTIGO	35235920	1093880	ND

ND valor no dominado

En la tabla 10 se presenta el análisis marginal, donde se observa que todos los tratamientos presentan una tasa de retorno marginal superior al 80% (tasa mínima de retorno aceptable), en la cual se tiene en cuenta el costo de oportunidad del capital de operación (Lopera y Lopera, 1986). Permitiendo recomendar éstos tratamientos como alternativas para la producción de lechuga *Lactuca sativa* L., en los suelos estudiados y cuya escogencia va a depender de la inversión del agricultor. Así, el paso a la aplicación

de fósforo con MAP-AVAIL en dosis de 50 kg de P₂O₅ ha⁻¹, implicó un incremento de \$491.260 en los costos y de \$9.815.005 en el beneficio neto, encontrando que por cada peso adicional que se invierta en el cambio de alternativa se está ganando \$19,97. El paso de la alternativa anterior, a la fuente DAP con dosis de 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹, implicó un incremento de \$216.723 en los costos y \$1.401.162 en el beneficio neto, demostrando que por cada peso adicional invertido en este cambio de alternativa se está ganando \$6,46, y cambiar la alternativa anterior, con la fuente MAP en dosis de 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹, implicó un incremento de \$103.337 en los costos y \$4.100.338 en el beneficio neto, indicando que por cada peso adicional invertido en este cambio de alternativa se está ganando \$39,67.

Tabla 10. Análisis marginal de los tratamientos no dominados para la producción de lechuga *Lactuca sativa* L., obtenida con la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo en dos suelos derivados de cenizas volcánicas del municipio de Pasto, Nariño.

TRATAMIENTO	BENEFICIO NETO	COSTO VARIABLE	INCREMENTO MARGINAL BEN. NETO	INCREMENTO MARGINAL COSTOS VARIABLES	TASA DE RETORNO MARGINAL (%)
MAP 100	50552425	1905200	4100338	103337	3967,9282
DAP 100	46452087	1801863	1401162	216723	646,52206
AVAIL 50	45050925	1585140	9815005	491260	1997,9247
TESTIGO	35235920	1093880			

CONCLUSIONES

Las fuentes de fósforo afectaron el contenido de la materia seca de la lechuga, mientras que las dosis influyeron sobre el peso de la materia seca, el diámetro de cabeza y el rendimiento.

Dentro de la fuente MAP - AVAIL la dosis de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ fue la más apropiada porque logro resultados estadísticamente iguales a los de 100 y 150 kg P₂O₅ ha⁻¹ en las diferentes variables evaluadas.

El análisis económico del rendimiento, mostró que una tasa de retorno marginal superior al 80% se obtuvo cuando se fertilizó con MAP- AVAIL en dosis de 50 kg P₂O₅ ha⁻¹, DAP y MAP en dosis de 100 kg P₂O₅ ha⁻¹, cuya escogencia depende de la capacidad de inversión del agricultor.

BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO, A., BERTSCH, F., BORNEMISZA, E., CABALCETA, G., FORSYTHE, W., HENRIQUEZ, C., MATA, R., MOLINA, E y SALAS, R. Suelos derivados de cenizas volcánicas (andisoles) de Costa Rica. Primera edición, San José, Costa Rica: ACCS, 2001. 111p.

AMADEO, C. 2008. Movilidad del fósforo en el suelo. (Consultado el 6 de Junio, 2009). Disponible en Internet: <http://www.fertilizando.com>

AVILA, C y VELANDIA, J. 1992. Enfermedades de algunas especies hortícolas y su manejo. En: primer curso nacional de hortalizas de clima frío. Mosquera. Colombia, ICA. pp. 106-110.

BARRERA, J., DÍAZ, P., DURANGO, J y RAMOS, A. 2008. Efecto de las épocas de lluvia y sequía sobre la adsorción de potasio y fósforo en plantaciones de plátano. (Consultado el 6 de Junio, 2009). Disponible en Internet: http://www.revistasunal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/1055/1548_

BENAVIDES de, G. 1987. Determinación de las propiedades ándicas en algunos suelos de Colombia. Suelos Ecuatoriales 17(2): 332-337.

BLASCO, M. 1969. Características químicas de los suelos volcánicos de Nariño, Colombia. En: I panel de suelos volcánicos de latino América. Centro de enseñanza e investigación (IICA). Turrialba. Costa Rica. pp 81-84.

BURBANO, J y CABRERA, T. 1971. Capacidad de fijación de fósforo en suelos de cuatro áreas volcánicas de Colombia y su relación con algunas características edáficas. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo). Pasto, Colombia, Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Agrícolas. . 130 p.

CASTRO, H. 1998. Producción y fertilización de hortalizas en Colombia. En: Fertilización de cultivos en clima frío. Ricardo Guerrero Editor. Monómeros Colombo Venezolanos S.A (E.M.A). Santafé de Bogotá. Colombia. pp 206-207.

ESPINOSA, J 1998. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica. (Consultado el 22 de Agosto, 2008). Disponible en Internet: http://www.redpav.avepagro.org.ve/fagro/v17_14/v171a050.html

FASSBENDER, H., y BORNEMISZA, E. 1987. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Editorial IICA, San José, Costa Rica. 420 p.

FERNANDEZ, C., VAZQUEZ, S., DALURZO, H y MORALES L. 2001. Índice de disponibilidad del fósforo proveniente del fertilizante en suelos de la provincia de Misiones, Argentina. Agricultura Técnica (Chile). 61(2): 28-34.

GAMBOA, J. 1972. Variabilidad de los niveles nutricionales y fertilidad de los suelos andinos de Nariño, Colombia. En: II Panel sobre suelos volcánicos de América. Universidad de Nariño. Facultad de Ciencias Agrícolas. Pasto. Colombia. pp 401-407.

GONZÁLES, H 2003. Características generales de clima y suelos de las zonas paperas de Antioquia. (Consultado el 3 de junio, 2009). Disponible en Internet: <http://www.gobant.gov.co/organismos/agricultura/papa/cadena%20papa/Antioquia.pdf>

GUERRERO, R. 1998. Propiedades generales de los fertilizantes. Monómeros Colombo Venezolanos S.A (E. M. A), Sáenz y Cia, Ltda, Bogotá; Colombia. 51p.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC). 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras, departamento de Nariño. Cap. 3 Descripción de los Suelos. Bogotá (Colombia).

ISQUISA. Fosfato monoamónico (MAP) y fosfato diamónico (DAP). 2007. (consultado el 2 de Julio, 2009). Disponible en Internet: <http://www.isquisa.com/site/files/productos/Fosfato.pdf>

LOPERA, J y LOPERA, H. 1986. Manual de análisis socioeconómico de resultados de ajuste de tecnología. Colombia. 95 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. 2005. Consolidado agropecuario de Nariño. Gobernación de Nariño. Secretaria de agricultura y medio ambiente. Pasto. pp 33-34.

OSORIO, J. 1992. Generalidades de la producción de hortalizas en Colombia. En: primer curso nacional de hortalizas de clima frío Tibaitatá, Colombia, ICA. pp 5-13.

PELLERIN, S. y MOLLIER, A. 2001. How to include mineral nutrition in crop growth models? The example of phosphorus on maize: Plant nutrition food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers. pp. 110-111.

PERRIN, R., WINKELMAN, D., MOSCARDI, E., y ANDERSON, J. 1976. formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: un manual metodológico de evaluación económica. México, CIMMYT. 54 p.

ROVEDA, G. y POLO, C. 2007. Mecanismos de adaptación de maíz asociado a *Glomus spp.* en suelos con bajo fósforo disponible. *Agronomía Colombiana* 25(2): 47-59.

RUSSO, V y PAPPALIS, A. 1995. Senescence in sweet corn as influenced by phosphorous nutrition. *Plant Nutr.* 18(4), 707-717.

SALUNKHE, D. y KADAM, S. 2004. Tratado de ciencia y tecnología de las hortalizas. Producción composición almacenamiento y procesado. Ed ACRIBIA S.A. Zaragoza, España. pp. 505-522.

SCHULTHESS, C. 2005. Soil chemistry with applied mathematics. Trafford Publishing, Victoria (Canada). 292 p.

SILVA, M., ROLLAN, A y BACHMEIER, O. 2006. Biodisponibilidad de fósforo en un suelo del sur de Santa Fe, Argentina: Efectos de dos fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea. Agriscientia (Córdoba) 23(2):91-97.

SAÑUDO, B., ARTEAGA, G., CHÁVEZ, G., VALLEJO, W y AREVALO, R. 2002. Introducción al manejo técnico de cultivos hortícolas en la zona cerealista de Nariño. UNIGRAF Litografía, Universidad de Nariño. Pasto. pp 89-95.

SEMILLAS ARROYAVE. Coolguard lechuga tipo escarola. 2003 (Consultado el 3 de Julio, 2009). Disponible en Internet: <http://www.semillasarroyave.com>

Specialty Fertilizer Products, 2005. Avail reduces phosphorus fixation for corn, soybeans and wheat. (Consultado el 5 de Mayo, 2009). Disponible en internet: <http://www.specialtyfertilizer.com>

TISDALE, S. 1993. Soil fertility and fertilizers. Quinta edición. MacMillan Publishing Company. New York. 694 p.