

Diseños de superficie para determinar los niveles de N y P que maximizan el rendimiento de tomate

Surface designs to determine the levels of N and P that maximize yield of tomato

Alex Lázaro Tineo Bermúdez^{1*}, Pepe Ayala Prado¹ y Carlos Francisco Cabrera Carranza²

¹ Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias. Av. Independencia S/N, Ciudad Universitaria, Ayacucho, Perú.

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Av. Venezuela Cdra. 34 S/N, Ciudad Universitaria, Lima, Perú.

*Autor para correspondencia:

tineoalex@hotmail.com;
alex.tineo@unsch.edu.pe

Conflicto de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés

Licencia:

Creative Commons CC-BY

Historial:

Recibido: 20/11/17;
Aceptado: 17/05/19

Periodo de Publicación:

Enero-Junio de 2019

RESUMEN

La metodología de superficies de respuesta, introducida originalmente por Box y Hunter en 1951, ha permitido el desarrollo de varios diseños, como el Diseño San Cristóbal desarrollado por Rojas en 1962, para investigación con fertilizantes (Chacín, 1998). Con la finalidad de determinar la influencia de la aplicación de niveles (0 a 360 kg ha⁻¹) de N y P₂O₅ en el rendimiento de tomate y la similitud de los modelos de superficie, estimados mediante diseños de superficie de respuesta, se realizó la presente investigación en ambientes de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSC), en Ayacucho, Perú. Se cultivó tomate en ambiente protegido, empleando cuatro diseños de superficie (Diseño Compuesto Central Rotable: DCCR, Diseño San Cristóbal: DSC, Diseño 03 de Julio: D3J y Factorial Completo: DFC). Los resultados demuestran que los rendimientos de frutos de tomate obedecen a los modelos: $Y = 12292 + 104.77794*N + 87.27649*P_2O_5 - 0.12524*N^2 - 0.13156*P_2O_5^2 - 0.05242*N*P_2O_5$ (DCCR); $Y = 13121 + 102.98407*N + 51.88371*P_2O_5 - 0.14659*N^2 - 0.02645*P_2O_5^2 + 0.00512*N*P_2O_5$ (D3J); $Y = 13255 + 120.28556*N + 97.79306*P_2O_5 - 0.24539*N^2 - 0.16289*P_2O_5^2 + 0.07365*N*P_2O_5$ (DSC); $Y = 11401 + 103.54156*N + 83.1667*P_2O_5 - 0.17911*N^2 - 0.14172*P_2O_5^2 + 0.0747*N*P_2O_5$ (DFC). Se concluye que: 1. El N (urea) tiene mayor influencia que el P₂O₅ (superfosfato triple), en el rendimiento de frutos de tomate; 2. Existe mayor similitud entre los valores estimados correspondientes a los diseños DCCR y D3J, con los del DFC, manifestándose mejor a niveles medios de N y P₂O₅ (180 kg ha⁻¹).

Palabras clave: *Lycopersicum esculentum*, superficies de respuesta, nitrógeno, fósforo

ABSTRACT

The methodology of response surfaces, originally introduced by Box and Hunter in 1951, has allowed the development of several designs, such as the San Cristóbal Design developed by Rojas in 1962, for research with fertilizers (Chacín, 1998). In order to determine the influence of the application of levels (0 to 360 kg ha⁻¹) of N and P₂O₅ on the tomato yield and the similarity of the surface models, estimated by response surface designs, the present research in environments of the National University of San Cristóbal de Huamanga (UNSC), in Ayacucho, Peru. Tomato was cultivated in a protected environment, using four surface designs (Central Composite Design Rotable: DCCR, Design San Cristóbal: DSC, Design July 3: D3J and Complete Factorial: DFC). The results show that the yields of tomato fruits obey the models: $Y = 12292 + 104.77794*N + 87.27649*P_2O_5 - 0.12524*N^2 - 0.13156*P_2O_5^2 - 0.05242*N*P_2O_5$ (DCCR); $Y = 13121 + 102.98407*N + 51.88371*P_2O_5 - 0.14659*N^2 - 0.02645*P_2O_5^2 + 0.00512*N*P_2O_5$ (D3J); $Y = 13255 + 120.28556*N + 97.79306*P_2O_5 - 0.24539*N^2 - 0.16289*P_2O_5^2 + 0.07365*N*P_2O_5$ (DSC); $Y = 11401 + 103.54156*N + 83.1667*P_2O_5 - 0.17911*N^2 - 0.14172*P_2O_5^2 + 0.0747*N*P_2O_5$ (DFC). It is concluded that: 1. N (urea) has a greater influence than P₂O₅ (triple superphosphate) on the yield of tomato fruits; 2. There is greater similarity between the estimated values corresponding to the DCCR and D3J designs, with those of the DFC, showing better results at average levels of N and P₂O₅ (180 kg ha⁻¹).

Key words: *Lycopersicum esculentum*, response surfaces, nitrogen, phosphorus

INTRODUCCIÓN

La experimentación con fertilizantes, es uno de los campos, en donde el arreglo factorial de tratamientos ha tenido mayor uso, debido principalmente a que en la mayoría de los casos se desea obtener información para más de un nutriente y la posible interacción existente entre los nutrientes en estudio; se sabe que la principal desventaja de los arreglos factoriales completos es que al aumentar el número de factores o niveles, esto incrementa las combinaciones, llegando a imposibilitar la conducción de experimentos en campo.

Este problema fue tratado por diversos investigadores (Chacín, 1998, cita a Box y Wilson 1951, Rojas 1962 y 1971, Villasmil, Martínez y Segura 1972, Montano 1972) logrando dar origen los diseños de superficie de respuesta, inicialmente utilizados en experimentos industriales, y actualmente muy populares en investigaciones agronómicas. La Metodología de Superficies de Respuesta (MSR) es una combinación de análisis de Regresión y Diseño Experimental que fue introducida por Box y Wilson en 1951.

Es una estrategia de experimentación secuencial y modelación que conduce a la localización de los valores óptimos de las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta (Martínez Garza, 1988; Jiménez Careaga, 2015).

Según Tineo Bermúdez (2014), la aplicación del Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) en experimentos con fertilizantes presenta la desventaja de no incluir un testigo (tratamiento sin aplicación de fertilizantes) y ante esta dificultad se han desarrollado diseños para ser utilizados en el campo agronómico, principalmente en experimentos de fertilización en diversos cultivos; así, Rojas en 1962 ideó el Diseño San Cristóbal (DSC), Tineo en 2002 el Diseño 03 de Julio (D3J).

Se han realizado trabajos para comparar la variabilidad y eficiencia de diferentes diseños de superficie de respuesta respecto a un factorial completo, como el de Briones y Martínez (2002), o el de Tineo Bermúdez (2015) en un cultivo de tomate con tres diseños (DCCR, D3J y DSC), quien encontró tendencias similares entre los modelos correspondientes a los diseños DCCR y D3J.

La presente investigación se realizó con la finalidad de determinar la influencia de la aplicación de niveles crecientes de N y P en el rendimiento de tomate y la similitud de los modelos de superficie, estimados mediante cuatro diseños de superficie de respuesta; consistió en realizar un experimento de fertilización en tomate, en ambiente protegido con mallas y con dotación de riego localizado. Se han utilizado los diseños DCCR y D3J (de 5 niveles), así como el DSC y factorial completo (de 4 niveles).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en ambientes del Programa de Investigación en Pastos y Ganadería (PIPG) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), ubicada en la localidad de Pampa del Arco, Ayacucho, Perú, a 2760 msnm. La unidad experimental (UE) consistió en macetas cónicas (40 cm de altura, 27 cm de diámetro en la base inferior y 29 cm de diámetro en la base superior) de material plástico, con capacidad para 20 kg de suelo, en las cuales se cultivó una planta de tomate variedad Río Grande proveniente de un almácigo, con riego por goteo en un ambiente protegido con mallas (a manera de invernadero).

La muestra de suelo se obtuvo de un terreno; de topografía plana, superficial, textura franco arcillo arenosa, pH 8,2, capacidad de campo 28%, punto de marchitez 15%, y densidad aparente 1,32 g cm⁻³. Las características químicas, determinadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas del PIPG – UNSCH, indican que el suelo tiene 4,3% de materia orgánica, 0,21% de N total, 18,8 ppm de P disponible, 188 ppm de K disponible; su CIC es de 14,7 Cmol(+) kg⁻¹, los cationes cambiabiles, predominantes son: Ca⁺², Mg⁺², K⁺, 9,8, 2,1, y 0,9 Cmol(+) kg⁻¹, respectivamente.

Se utilizaron semillas de tomate variedad Río Grande (rastrera, de crecimiento determinado, vigoroso, con frutos alargados cilíndricos, firmes con mucha pulpa y buen sabor, para consumo en fresco o uso industrial). Las fuentes de N y P fueron urea y superfosfato de Ca triple (ST), respectivamente.

Los factores en estudio fueron N y P₂O₅, cada uno con cuatro o cinco niveles, de 0 a 360 kg ha⁻¹, según la estructura de los cuatro diseños empleados: DCCR, DSC, D3J y DFC (Tabla 1, Figura 1).

Tabla 1. Niveles de N y P₂O₅ en los diseños DCCR, D3J, DSC y DFC.

Nivel	Codificado (Xi)	Niveles del factor Zi (kg ha ⁻¹)	
		Nitrógeno (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)
Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR)			
1	-1.414	0	0
2	-1	53	53
3	0	180	180
4	1	307	307
5	1.414	360	360
Diseño 03 de Julio (D3J)			
1	-2	0	0
2	-1	90	90
3	0	180	180
4	1	270	270
5	2	360	360
Diseño San Cristóbal (DSC) y Factorial Completo 4*4 (DFC)			
1	0	0	0
2	1	120	120
3	2	240	240
4	3	360	360

Xi: Valor codificado de los niveles de ensayo

Zi: Niveles reales de N y P₂O₅ (Z₁= Nitrógeno sintético; Z₂= Fósforo sintético)

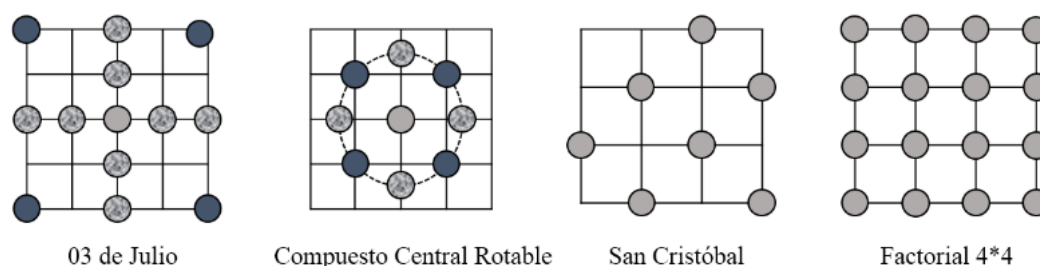


Figura 1. Estructura de tratamientos para dos factores en cuatro Diseños de Superficie.

Tabla 2. Estructura de tratamientos con el Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR).

Nº de tratamiento	Nivel codificado		Niveles reales					
	X ₁	X ₂	kg ha ⁻¹		g maceta ⁻¹		Fuente (kg ha ⁻¹)	
			N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	Urea	ST
1	-1	-1	53	53	0,53	0,53	115,22	115,22
2	1	-1	307	53	3,07	0,53	667,39	115,22
3	-1	1	53	307	0,53	3,07	115,22	667,39
4	1	1	307	307	3,07	3,07	667,39	667,39
5	-1,414	0	0	180	0	1,80	0,00	391,30
6	1,414	0	360	180	3,60	1,80	782,61	391,30
7	0	-1,414	180	0	1,80	0	391,30	0,00
8	0	1,414	180	360	1,80	3,60	391,30	782,61
9	0	0	180	180	1,80	1,80	391,30	391,30

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos (Tablas 2, 3, 4 y 5, Figura 1) resultaron de combinar los niveles de N y P según la estructura de cada diseño de superficie (DCCR, D3J, DSC y DFC); estos tratamientos, se asignaron en el área experimental, de acuerdo al Diseño

Completamente al Azar. Las unidades experimentales (UE) estuvieron distribuidas en 18 filas (separadas a 0,75 m) y 10 columnas (separadas a 0,50 m); de manera que fue necesario construir un ambiente protegido con mallas de 78 m² (13 m x 6 m), para albergar 180 plantas de tomate.

Tabla 3. Estructura de tratamientos con el Diseño 03 de Julio (D3J).

N° de tratamiento	Nivel codificado		Niveles reales					
			kg ha ⁻¹		g maceta ⁻¹		Fuente (kg ha ⁻¹)	
	X ₁	X ₂	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	Urea	ST
1	-2	-2	0	0	0	0	0,00	0,00
2	2	-2	360	0	3,60	0	782,61	0,00
3	-2	2	0	360	0	3,60	0,00	782,61
4	2	2	360	360	3,60	3,60	782,61	782,61
5	-2	0	0	180	0	1,80	0,00	391,30
6	-1	0	90	180	0,90	1,80	195,65	391,30
7	1	0	270	180	2,70	1,80	586,96	391,30
8	2	0	360	180	3,60	1,80	782,61	391,30
9	0	-2	180	0	1,80	0	391,30	0,00
10	0	-1	180	90	1,80	0,90	391,30	195,65
11	0	1	180	270	1,80	2,70	391,30	586,96
12	0	2	180	360	1,80	3,60	391,30	782,61
13	0	0	180	180	1,80	1,80	391,30	391,30

Tabla 4. Estructura de tratamientos con el Diseño San Cristóbal (DSC).

N° de tratamiento	Nivel codificado		Niveles reales					
			kg ha ⁻¹		g maceta ⁻¹		Fuente (kg ha ⁻¹)	
	X ₁	X ₂	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	Urea	ST
1	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
2	2	0	240	0	2,40	0	521,74	0,00
3	0	2	0	240	0	2,40	0,00	521,74
4	2	2	240	240	2,40	2,40	521,74	521,74
5	1	1	120	120	1,20	1,20	260,87	260,87
6	3	1	360	120	3,60	1,20	782,61	260,87
7	1	3	120	360	1,20	3,60	260,87	782,61

Tabla 5. Estructura de tratamientos con el Factorial Completo 4^2 (DFC).

N° de tratamiento	Nivel codificado		Niveles reales					
	X ₁	X ₂	kg ha ⁻¹		g maceta ⁻¹		Fuente (kg ha ⁻¹)	
			N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	Urea	ST
1	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
2	0	1	0	120	0	1,20	0,00	260,87
3	0	2	0	240	0	2,40	0,00	521,74
4	0	3	0	360	0	3,60	0,00	782,61
5	1	0	120	0	1,20	0	260,87	0,00
6	1	1	120	120	1,20	1,20	260,87	260,87
7	1	2	120	240	1,20	2,40	260,87	521,74
8	1	3	120	360	1,20	3,60	260,87	782,61
9	2	0	240	0	2,40	0	521,74	0,00
10	2	1	240	120	2,40	1,20	521,74	260,87
11	2	2	240	240	2,40	2,40	521,74	521,74
12	2	3	240	360	2,40	3,60	521,74	782,61
13	3	0	360	0	3,60	0	782,61	0,00
14	3	1	360	120	3,60	1,20	782,61	260,87
15	3	2	360	240	3,60	2,40	782,61	521,74
16	3	3	360	360	3,60	3,60	782,61	782,61

Instalación y conducción del experimento

Preparación del almácigo. Consistió en la siembra de semillas de tomate en surco corrido, en una caja almaciguera de 40 cm x 50 cm, en cantidad suficiente como para cubrir la totalidad de las unidades experimentales. Después de 30 días de sembradas las semillas, las plántulas ya estaban en condiciones de ser trasplantadas.

Abonamiento y trasplante. Consistió en aplicar lombricompost equivalente a 5 t ha⁻¹, en todas las UE; asimismo, todo el N (urea, 46% N) y P₂O₅ (superfosfato de Ca triple, 46% P₂O₅), según los tratamientos establecidos por los diseños de superficie de respuesta (DCCR, DSC, D3J y DFC). Esta operación se realizó mezclando el lombricompost y los fertilizantes de N y P₂O₅ con 2 kg de suelo de la parte superficial de la maceta. Luego de agregar 2 litros de agua, se procedió a realizar el trasplante de las plántulas de tomate del almácigo, dejando una plántula por UE (maceta). La importancia del abono orgánico es reconocida por muchos autores; asimismo, resaltada por Berrospe-Ochoa, Ordaz-Chaparro, Rodríguez-Mendoza y Quintero-Lizaola (2012) y Castello et al. (2016).

Conducción del cultivo. Esta etapa, que duró desde el trasplante hasta culminar con la cosecha de frutos, consistió en realizar labores de deshierbo y riego de acuerdo a los requerimientos del cultivo; la cosecha de frutos se inició el 02 de agosto de 2016.

Cosecha y determinación del rendimiento de frutos. Consistió en determinar el rendimiento de frutos en cada unidad experimental, para el cual se pesaron los frutos cosechados (gramos por planta) a medida que alcanzaban la madurez de cosecha. Se utilizaron fichas de evaluación para registrar los rendimientos obtenidos en cada maceta.

Análisis estadísticos

Con los resultados obtenidos se realizaron los análisis estadísticos siguientes: 1.- Análisis de la variancia (ANAVA), 2.- Análisis de regresión para determinar el modelo polinomial de segundo grado (superficie de respuesta) que explica el efecto de N y P en el rendimiento del cultivo ($Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 + e$), 3.- Comparación del grado de similitud (aproximación) entre los valores estimados con los diferentes diseños de superficie (DCCR, D3J y DSC) y los

estimados con el Factorial completo (DFC), en base a cuatro (16 puntos) y cinco (25 puntos) niveles de N y P; en este caso un menor valor (valor absoluto de la sumatoria de las diferencias de los 16 o 25 valores estimados) indica mayor similitud entre los diseños considerados, asimismo un valor mayor indica menor similitud entre dichos diseños. El criterio para comparar 16 valores estimados, es porque la estructura de tratamientos de los diseños DSC y DFC se origina a partir de cuatro niveles, mientras que de los diseños D3J y DCCR se origina a partir de cinco niveles (Tabla 1, Figura 1). La representación matemática de la similitud entre el DFC y los diseños de superficie empleados (DCCR, D3J, DSC), es la siguiente:

$$(S_{j-j'}) = \left| \sum_{i=1}^n (Y_{ij} - Y_{ij'}) \right|$$

Donde: $(S_{j-j'})$: Similitud entre el modelo DFC y otro diseño de superficie (D3J, DCCR, DSC)

$Y_{ij} - Y_{ij'}$: Diferencia entre los valores estimados ($n = 16$ o 25)

Para los análisis 1 y 2 se utilizó el Software SAS, para el análisis 3 y para los gráficos correspondientes, la planilla electrónica Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variancia del rendimiento de frutos (kg ha^{-1})

La Tabla 6, de cuadrados medios del análisis de la variancia (ANAVA), indica diferencias altamente

significativas entre los tratamientos, en todos los diseños empleados, con coeficientes de variación menores a 2%, que indican poca variabilidad entre las unidades experimentales sometidas a los mismos tratamientos; las que pueden explicarse por las condiciones en las que se condujo el ensayo: en ambiente protegido, con riego por goteo, con plantas procedentes de almácigo.

En todos los diseños de superficie utilizados, los tratamientos que no recibieron abonamiento (testigo) resultaron ser estadísticamente los de más bajo rendimiento (alrededor de 13 t ha^{-1}); los rendimientos más altos variaron entre 41 y 51 t ha^{-1} .

Los valores más altos de rendimiento encontrados en el presente trabajo coinciden con los encontrados por Araujo, Telhado, Sakai, Ledo & Melo (2016), quienes alcanzaron 51 t ha^{-1} con cultivares IAC (Instituto Agronómico de Campinas) abonados con $1,08 \text{ t ha}^{-1}$ yeso, $6,09 \text{ t ha}^{-1}$ Producto Comercial (16% P_2O_5), 40 t ha^{-1} compost (1% N), 160 kg ha^{-1} sulfato de potasio (50% K_2O), equivalentes a 974 kg ha^{-1} P_2O_5 , 40 kg ha^{-1} N, y 80 kg ha^{-1} K_2O , respectivamente.

Sin embargo, son superiores a los reportados por Monzón Sequeiros (2016), que obtuvo rendimientos desde $15,8$ (testigo) hasta $27,6$ (abonado con $15,8 \text{ t ha}^{-1}$ de cuyinaza), e inferiores al obtenido por Perrens Orué, Enciso Garay y Ríos Arévalos (2008), que alcanzaron hasta $89,1 \text{ t ha}^{-1}$ con la variedad Río Grande Brasileiro.

Tabla 6. Cuadrados medios de los ANAVA del rendimiento de frutos de tomate, utilizando cuatro diseños de superficie.

Fuente	DCCR	D3J	DSC	DFC
Tratamientos	184005764**	283408163**	373548785**	358957046**
Error	135818	143702	272576	259340
C.V. (%)	1,11	1,16	1,60	1,63

** Diferencia altamente significativa ($\alpha: 0,01$)

Análisis de regresión del rendimiento de frutos (kg planta^{-1})

La Tabla 7, de los parámetros estimados de la regresión, muestra los coeficientes para cada uno

de los modelos correspondientes a los cuatro diseños de superficie empleados. Los coeficientes de variación se sitúan entre $5,9$ y $12,2\%$. Con excepción del D3J, donde el P sólo alcanza

respuesta lineal, en los otros diseños (DCCR, DSC y DFC) el N y P alcanzan respuestas lineal y cuadrática; este resultado tiene que ver con los niveles de N y P que maximizan el rendimiento, que en el caso del D3J sale fuera de los límites ensayados.

Tabla 7. Coeficientes de regresión de cuatro modelos de superficie.

Coeficientes	DCCR	D3J	DSC	DFC
Intercepto	12291,84**	13020,99**	13254,99**	11401,19**
N lineal	104,77794**	102,98407**	120,28556**	103,54156**
P lineal	87,27649**	51,88371**	97,79306**	83,1667**
N cuadrático	-0,12524**	-0,14659**	-0,24539**	-0,17911**
P cuadrático	-0,13156**	-0,02645 ^{ns}	-0,16289**	-0,14172**
Interacción N*P	-0,05242 ^{ns}	0,00512 ^{ns}	0,07365 ^{ns}	0,0747*
C.V. (%)	5,88	9,97	7,83	12,18

** Significativa al nivel α : 0,01; * Significativa al nivel α : 0,05; ^{ns} no significativa

De acuerdo a la Tabla 7, los modelos polinomiales para explicar la influencia de la fertilización nitrogenada (N) y fosfórica (P), en el rendimiento de frutos de tomate, serían:

- En el DCCR: $Y = 12292 + 104,77794*N + 87,27649*P_2O_5 - 0,12524*N^2 - 0,13156*P_2O_5^2 - 0,05242*N*P_2O_5$
- En el D3J: $Y = 13121 + 102,98407*N + 51,88371*P_2O_5 - 0,14659*N^2 - 0,02645*P_2O_5^2$

- + $0,00512*N*P_2O_5$
- En el DSC: $Y = 13255 + 120,28556*N + 97,79306*P_2O_5 - 0,24539*N^2 - 0,16289*P_2O_5^2 + 0,07365*N*P_2O_5$

- En el DFC: $Y = 11401 + 103,54156*N + 83,1667*P_2O_5 - 0,17911*N^2 - 0,14172*P_2O_5^2 + 0,0747*N*P_2O_5$

Los gráficos de superficie correspondientes a cada diseño se muestran en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

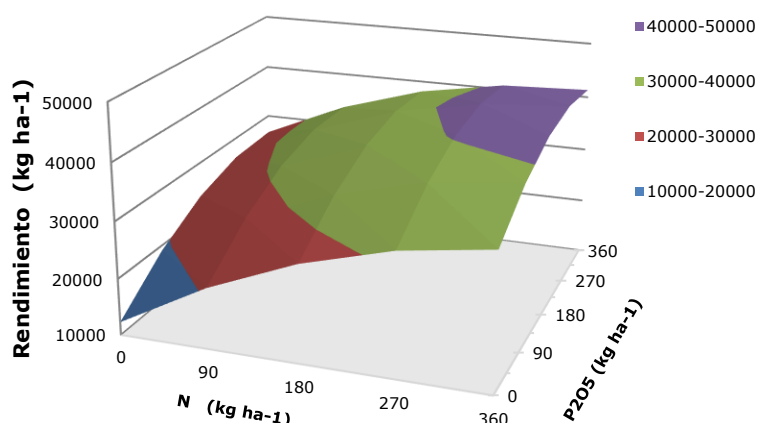


Figura 2. Rendimiento de tomate por influencia de N y P (Diseño Compuesto Central Rotable, DCCR).

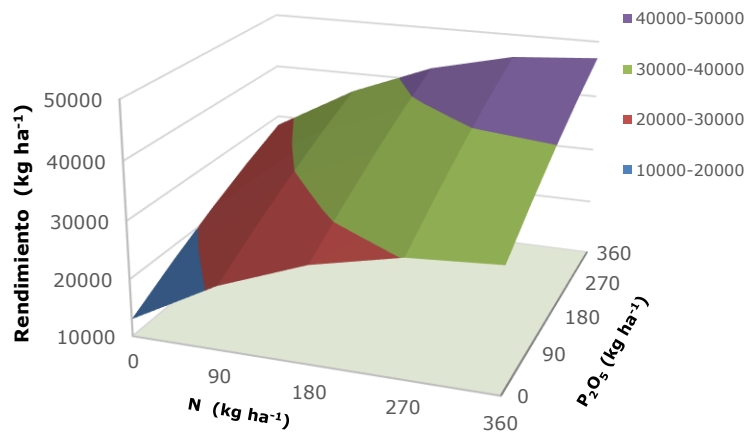


Figura 3. Rendimiento de tomate por influencia de N y P (Diseño 03 de Julio, D3J).

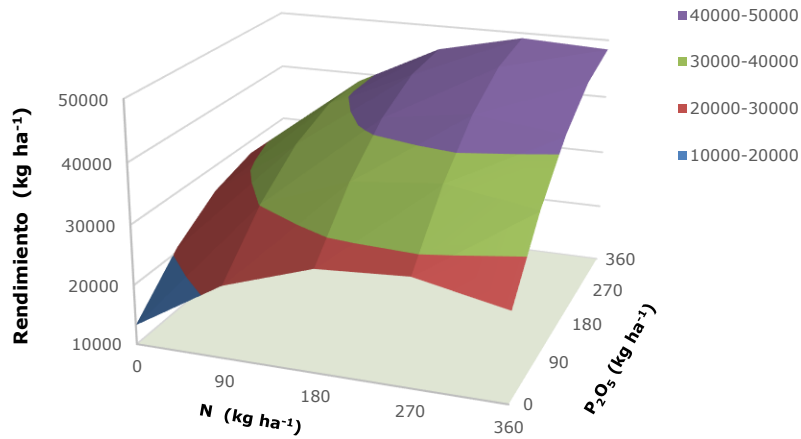


Figura 4. Rendimiento de tomate por influencia de N y P (Diseño San Cristóbal, DSC).

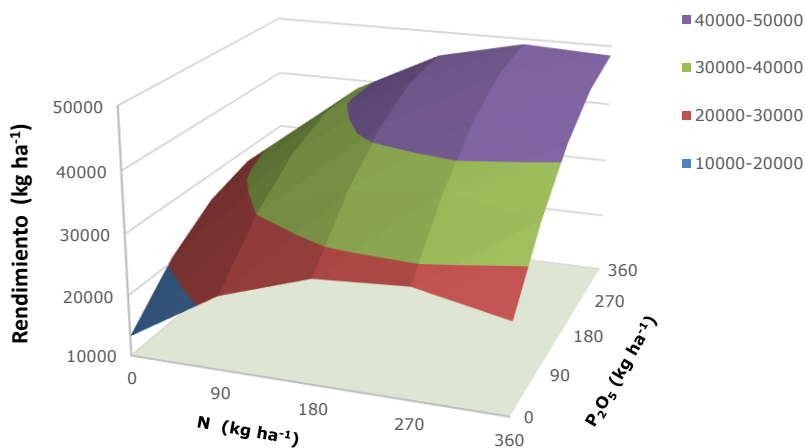


Figura 5. Rendimiento de tomate por influencia de N y P (Diseño Factorial Completo, DFC).

Aplicando la primera derivada a los modelos señalados, se han determinado los niveles de N y P que maximizan el rendimiento de tomate, que resultaron en los siguientes:

- Con el DCCR: N = 364,1 kg ha⁻¹, P₂O₅ = 259,2 kg ha⁻¹, para 42675 kg ha⁻¹
- Con el D3J: N = 369,0 kg ha⁻¹, P₂O₅ = 1016,5 kg ha⁻¹, para 58392 kg ha⁻¹
- Con el DSC: N = 300,3 kg ha⁻¹, P₂O₅ = 368,1 kg ha⁻¹, para 49315 kg ha⁻¹
- Con el DFC: N = 370,6 kg ha⁻¹, P₂O₅ = 391,1 kg ha⁻¹, para 46850 kg ha⁻¹

Se observa una buena aproximación para los niveles de N en los cuatro diseños; en el caso de P, el encontrado con el D3J discrepa significativamente del resto de los diseños.

Respecto a los valores de N y P encontrados en el presente trabajo, Marouelli, Souza, Braga & Silva (2014) ensayando seis dosis de N (0, 80, 160, 240, 320 y 400 kg ha⁻¹) en un cultivo de tomate con riego por goteo determinaron el nivel de N que maximiza el rendimiento de frutos, siendo 287 kg ha⁻¹; por su parte, Coutinho Edson, Orioli Júnior, Silva, Coutinho Neto y Cardoso (2014) utilizando cuatro dosis de P₂O₅ (0, 150, 300 y 600 kg ha⁻¹) determinaron que la fertilización fosfatada aumentó el contenido de P foliar y la producción de frutos, y la máxima producción de frutos comerciales fue obtenida con la aplicación (estimada) de 293 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

El hecho de que se hayan determinado niveles de N y P, que maximizan los rendimientos, sugiere que la aplicación excesiva de estos fertilizantes afecta negativamente el rendimiento, por la toxicidad provocada.

Comparación de los diseños de superficie en rendimiento de fruto de tomate

Al comparar las curvas de respuesta al P (Figuras 6, 7 y 8) y al N (Figuras 9, 10 y 11) se observa mayor grado de similitud (aproximación) entre las curvas correspondientes a los diseños D3J, DCCR con la del DFC, principalmente en presencia de los niveles medios (90, 180 y 270 kg ha⁻¹) de cualquiera de los dos factores (N o P).

Al respecto, Tineo Bermúdez (2015) reporta que de tres diseños de superficie empleados (DSC, DCCR y D3J), hay una mayor aproximación entre los valores estimados con los diseños DCCR y D3J, principalmente respecto a los valores estimados de N.

Las Figuras 6 al 11 se han elaborado en base a 25 puntos estimados, debido a que dos de los diseños (DCCR y D3J) utilizan cinco niveles en cada factor; sin embargo, también se realizó la comparación en base a 16 puntos estimados, considerando que el factorial completo (DFC) y el DSC utilizan cuatro niveles en cada factor.

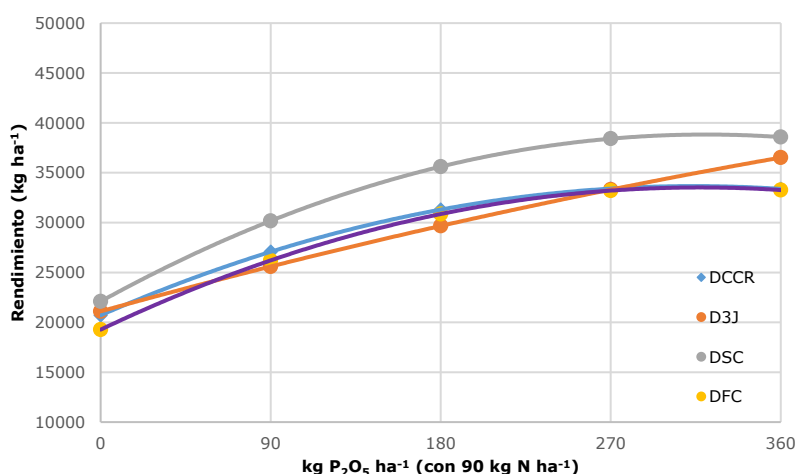


Figura 6. Respuesta del tomate al abonamiento con P₂O₅ (utilizando 90 kg N ha⁻¹).

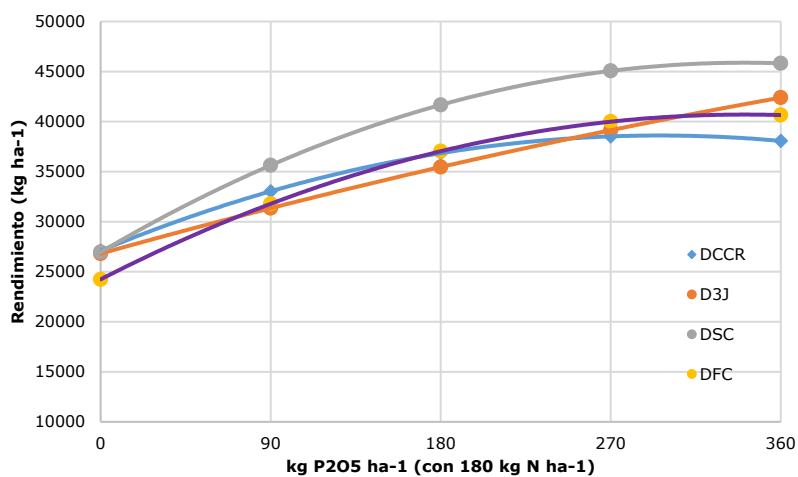


Figura 7. Respuesta del tomate al abonamiento con P₂O₅ (utilizando 180 kg N ha⁻¹).

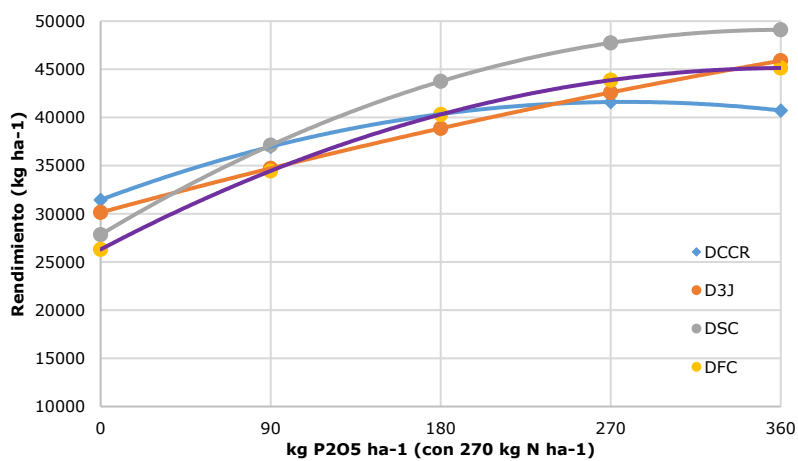


Figura 8. Respuesta del tomate al abonamiento con P₂O₅ (utilizando 270 kg N ha⁻¹).

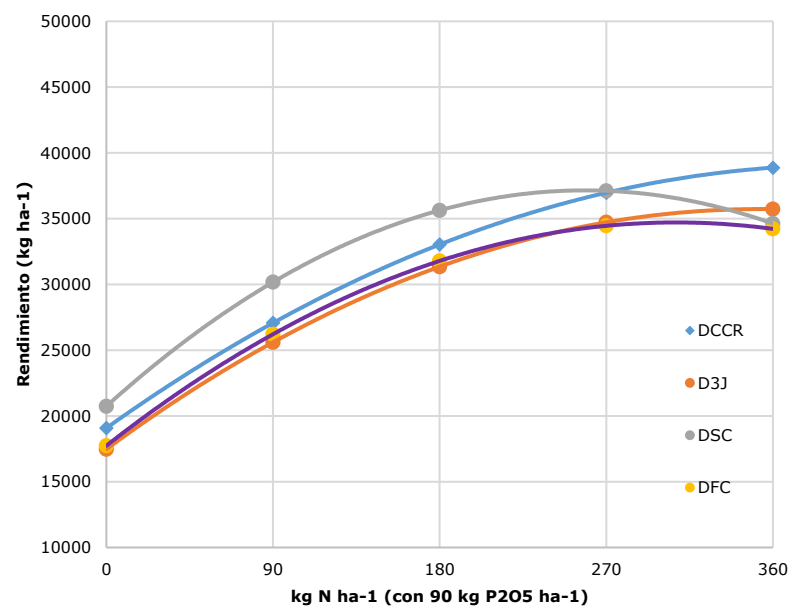


Figura 9. Respuesta del tomate al abonamiento con N (utilizando 90 kg P₂O₅ ha⁻¹).

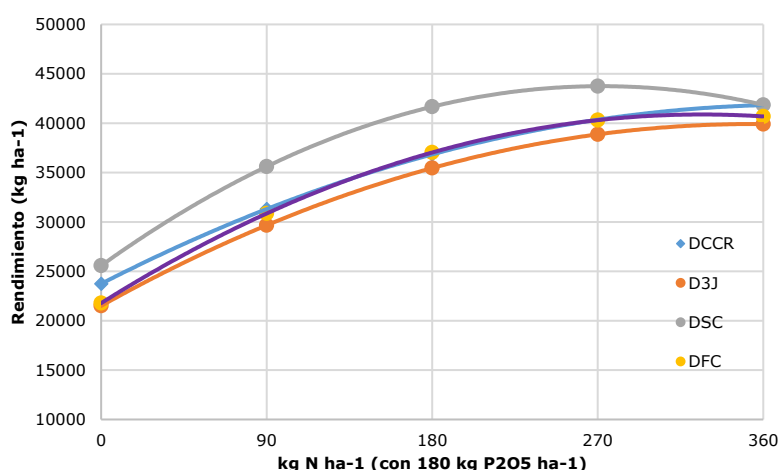


Figura 10. Respuesta del tomate al abonamiento con N (utilizando 180 kg P₂O₅ ha⁻¹).

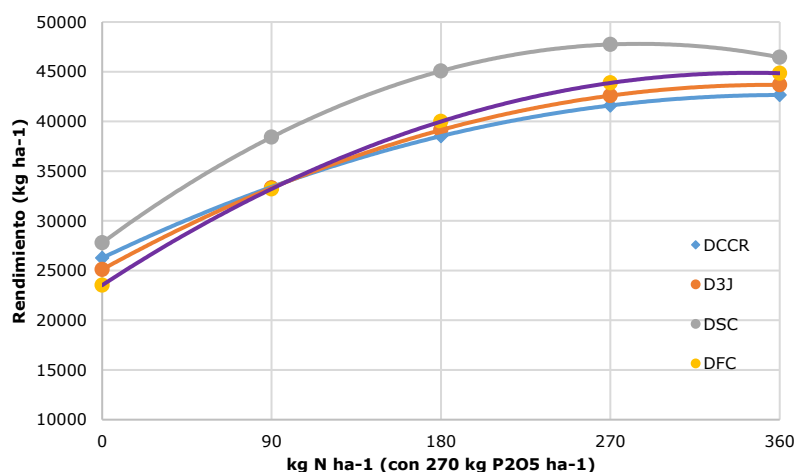


Figura 11. Respuesta del tomate al abonamiento con N (utilizando 270 kg P₂O₅ ha⁻¹).

La medida del grado de similitud en base a 25 puntos estimados con los modelos correspondientes a los cuatro diseños de superficie, resultaron en un mayor acercamiento de los valores del D3J y del DCCR con los valores del DFC. La variación del D3J respecto al DFC es 20417,67 kg ha⁻¹, mientras que las variaciones del DCCR y DSC respecto al DFC son respectivamente 1,04 y 3,94 veces mayores que al obtenido con el D3J (Tabla 8).

Tabla 8. Similitud entre el modelo del DFC y tres modelos de superficie (DCCR, D3J y DSC), con 16 y 25 valores estimados.

n	DCCR	D3J	DSC
16	16.102,05	18.043,66	49.663,47
25	21.153,11	20.417,67	80.409,42

También se ha medido el grado de similitud en base a 16 puntos estimados con los modelos correspondientes a los cuatro diseños de superficie

(Tabla 8); resultaron en un mayor acercamiento de los valores del DCCR y del D3J con los valores del DFC. La variación del DCCR respecto al DFC es 16.102 kg ha⁻¹, mientras que las variaciones del D3J y DSC respecto al DFC son respectivamente 1,12 y 3,08 veces mayores que al obtenido con el DCCR.

Según Montgomery (2004), el ajuste y análisis de superficies de respuesta se facilita en gran medida con la elección apropiada del diseño experimental. Cuando se selecciona un diseño de superficie de respuesta, es necesario considerar algunas características deseables; debe tomarse en cuenta que el DSC sólo utiliza cuatro niveles (0, 1, 2 y 3) en cada factor, mientras que los otros diseños (D3J y DCCR) utilizan cinco niveles en cada factor. Esta característica hace que el número de tratamientos en cada uno de estos diseños sea diferente (7 en el DSC, 9 en el DCCR, 13 en el D3J, y 16 en el factorial completo).

CONCLUSIONES

Los niveles crecientes de N (urea) tienen mayor influencia que los niveles crecientes de P (superfosfato triple), en el rendimiento de frutos de tomate.

A partir de los modelos obtenidos, los rendimientos máximos de tomate esperados y los niveles respectivos de N y P₂O₅ (kg ha⁻¹) son: Con el DCCR (42,675 t ha⁻¹ con 364,1 y 259,2 kg ha⁻¹), con el D3J (58,392 t ha⁻¹ con 369,0 y 1016,5 kg ha⁻¹), con el DSC (49,315 t ha⁻¹ con 300,3 y 368,1 kg ha⁻¹), y con el DFC (46,850 t ha⁻¹ con 370,6 y 391,1 kg ha⁻¹)

Se encontró mayor similitud entre los valores estimados correspondientes a los diseños DCCR y D3J, con los del DFC, manifestándose mejor a niveles medios de N y P.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa de Investigación en Pastos y Ganadería, por el apoyo otorgado para realizar la investigación en sus ambientes; asimismo, al Ing. Esteban Quispe Gómez, asistente de investigación por los cuidados del cultivo desde la instalación hasta la cosecha.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, J.C., Telhado, S.F.P., Sakai, R.H., Ledo, C.A.S. & Melo, P.C.T. (2016). Univariate and multivariate procedures for agronomic evaluation of organically grown tomato cultivars. *Horticultura Brasileira*, 34(3), 374-380.

Berrospe-Ochoa, E.A., Ordaz-Chaparro, V.M., Rodríguez-Mendoza, M.N. y Quintero-Lizaola, R. (2012). Cachaza como sustrato para la producción de plántula de tomate. *Revista Chapingo (Serie Horticultura)*, 18(1), 141-156.

Briones-Encinia, F. y Martínez-Garza, A. (2002). Eficiencia de algunos diseños experimentales en la estimación de una superficie de respuesta. *Agrociencia*, 36 (2), 201-210.

Chacín, F. (1998). *Análisis de Regresión y Superficie de Respuesta*. Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. 274 p.

Coutinho Edson, L.M., Orioli Júnior, V., Silva, E.J., Coutinho Neto, A.M. y Cardoso, S.S. (2014). Nutrición, producción y calidad de frutos de tomate para procesamiento en función de la fertilización con fósforo y potasio. *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 40-46.

Jiménez Careaga, M.G. (2015). Superficies de Respuesta mediante un Diseño Central Compuesto. *Revista Varianza*, 2015(11), 31-36.

Marouelli, W.A., Souza, R.B., Braga, M.B. & Silva, W.L.C. (2014). Evaluation of sources, doses and application schedules of nitrogen on drip-irrigated tomato. *Horticultura Brasileira*, 32(3), 327-335.

Martínez Garza, A. (1988). *Diseños experimentales: Métodos y elementos de teoría*. Ciudad de México, México: Trillas, 756 p.

Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. 2 ed. Ciudad de México, México: Limusa Wiley, 686 p.

Monzón Sequeiros, C.A. (2016). Evaluación del rendimiento de tomate de crecimiento indeterminado (*Lycopersicon esculentum* Mill) de variedades híbridos utilizando abonos fermentados de gallinaza y cuyaza – Abancay. Tesis Ingeniería. Ayacucho, Perú: Universidad Tecnológica de Los Andes, 151 p.

Perrens Orué, O.K., Enciso Garay, C.R. y Ríos Arévalos, R. (2008). Evaluación de variedades e híbridos de tomate rastrero. *Investigación Agraria*, 10(2),5-9.

Tineo Bermúdez, A.L. (2014). *Superficies de Respuesta: El Diseño 03 de Julio (Aplicaciones agronómicas)*. Ayacucho, Perú: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. 145 p.

Tineo Bermúdez, A.L. (2015). *Maximización del rendimiento de tomate (Lycopersicon esculentum) por aplicación de nitrógeno y fósforo*. Ayacucho, 2015. Informe final de investigación 2015. IIFCA-UNSC. Ayacucho, Perú. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, 32 p.