



Manejo de sistemas productivos

Artículos de investigación científica y tecnológica

Definición de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para una máxima producción del maíz híbrido Advanta 9313 mediante el diseño central compuesto

Definition of nitrogen, phosphorus and potassium doses for maximum production of the Advanta 9313 hybrid corn using the composite central design

 Freddy Carlos Gavilánez-Luna^{1*}  María José Gómez-Vargas¹

¹ Universidad Agraria del Ecuador, Milagro, Ecuador

*Autor de correspondencia: Universidad Agraria del Ecuador. Ciudad Universitaria Milagro, Av. La Granja y Emilio Morgner, Edificio E7, Oficina Lab Hidráulica, Milagro, Ecuador.
fgavilanez@uagraria.edu.ec

Recibido: 15 de septiembre de 2020
Aprobado: 26 de agosto de 2021
Publicado: 05 de febrero de 2022

Editora temática: Gustavo Adolfo Rodríguez Yzquierdo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-[AGROSAVIA]

Para citar este artículo: Gavilánez-Luna, F. C., & Gómez-Vargas M. J. (2022). Definición de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para una máxima producción del maíz híbrido Advanta 9313 mediante el diseño central compuesto. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23(1), e2225. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2225

Resumen: La falta de conocimiento en cuanto a los intervalos de macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) aplicados al maíz es una de las falencias que no permiten aprovechar la potencialidad de semillas certificadas, lo cual se complica aún más cuando no se utilizan los diseños experimentales adecuados para establecer dichos intervalos. Ante esta situación se desarrolló este ensayo con un arreglo factorial incompleto de segundo orden denominado diseño central compuesto (DCC), con el fin de identificar intervalos de macronutrientes para una mayor producción de maíz. Se empleó una distribución de bloques completos al azar, en los cuales se probaron 15 formulaciones (tratamientos) de N-P-K con tres repeticiones de cada una y como variable de respuesta se evaluó el rendimiento de grano seco. Los datos se valoraron mediante análisis de varianza para detectar efectos lineales y cuadráticos, se obtuvieron las respectivas superficies de respuesta y gráficas de contorno y se ajustó un modelo de segundo orden. Se estableció que los rendimientos de maíz más altos, ubicados entre 10 y 11 t/ha, se obtienen cuando se aplican entre 110 a 140 kg/ha de nitrógeno, de 50 a 70 kg/ha de fósforo y de 100 a 140 kg/ha de potasio. Además, se corrobora la bondad del DCC cuando se conocen los límites de operatividad experimental de los factores de estudio.

Palabras clave: diseño factorial, fertilización, manejo del cultivo, rendimiento de cultivos, *Zea mays*

Abstract: The absence of knowledge regarding the intervals of macro-nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) applied to corn is one of the flaws that do not allow us to take advantage of the potential of certified seeds, which is complicated even more so when the appropriate experimental designs are not used to establish the said intervals. Faced with this situation, this trial was developed with an incomplete second-order factorial arrangement called central compound design (DCC), in order to identify macro-nutrient intervals for greater corn production. A randomized complete block distribution was used in which 15 formulations (treatments) of N-P-K were tested with three repetitions of each one and the dry grain yield was evaluated as a response variable. The data were evaluated by means of analysis of variance to detect linear and quadratic effects, the respective response surfaces and contour graphs were obtained and a second order model was fitted. It was found that the highest corn yields, between 10 to 11 t/ha, were obtained when applying between 110 to 140 kg/ha of nitrogen, from 50 to 70 kg/ha of phosphorus and from 100 to 140 kg/ha of potassium; in addition to corroborating the goodness of the DCC when the limits of experimental operation of the study factors are known.

Keywords: crop management, crop yield, factorial design, fertilization, *Zea mays*



Introducción

El maíz, junto al arroz y al trigo, es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial debido a su multiplicidad de usos, entre los cuales se destaca su utilidad en la elaboración de balanceados para pollos y cerdos (Izquierdo & Cirilo, 2013; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). En Ecuador, la importancia de este cereal se refleja de forma significativa en la participación del 40,7 % que tiene entre los cultivos transitorios, lo cual representa un total de 383.399 ha, distribuidas en las provincias de Los Ríos (38,8 %), Manabí (24,9 %), Guayas (17,5 %) y Loja (12,3 %) (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2018).

A pesar de que existen materiales genéticos de maíz con potenciales de producción que bien pueden llegar a las 10 t/ha a nivel local (Caviedes, 2019), o más allá de este promedio a nivel internacional (Sadeghi et al., 2018), el manejo inadecuado de los factores de producción de este cultivo lleva a que la mayoría de los productores nacionales apenas tenga una media de 3,6 t/ha (INEC, 2018). Entre estos factores está la fertilización, pues la mayoría de los productores no define su planificación en función de los análisis de suelo, y los pocos que sí los realizan toman apenas pequeñas muestras, que en la práctica no representan efectivamente las áreas de terreno. Como consecuencia, se favorecen dosificaciones inadecuadas, ya sean en exceso o en déficit (Dias et al., 2020), lo cual limita la rentabilidad del cultivo.

El agricultor de sistemas convencionales tecnificados maneja la fertilización sin considerar lo que el suelo puede aportarle al cultivo (Bertsch, 1998), de manera que aplica dosis recomendadas en forma generalizada e invariante, las cuales podrían estar alejadas de las recomendaciones adecuadas. Estas aplicaciones de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, más que en exceso deficitarias, restringen la normal expresividad de los cultivos al limitar procesos fisiológicos, lo cual se evidencia en la falta de desarrollo de las plantas, sistemas radiculares poco vigorosos, disminución de la floración y fructificación, desmejoramiento de la calidad de los frutos, susceptibilidad al ataque de enfermedades y disminución de cosecha en general (Bonilla, 2008; Buckman & Brady, 1985).

Los extremos superiores en las dosificaciones de nutrientes como el nitrógeno aumentan la biomasa del maíz —no así su rendimiento de grano seco—, disminuyen su uso eficiente y crean potenciales problemas de contaminación ambiental (González et al., 2016). Las aplicaciones excesivas de fósforo en el maíz también generan un uso ineficiente que podría disminuir su rendimiento en un 26 % cuando la dosis de este nutriente varía de 160 a 200 kg/ha (Díaz-López et al., 2013). En el caso del potasio, a pesar de que los requerimientos de este elemento por parte de este cereal comparativamente son menores que los de fósforo y nitrógeno, lo que sí se ha definido es un efecto simbiótico con este último (Lascano-Ferrat, 2006), de allí que las dosis adecuadas de potasio estarán supeditadas a las de nitrógeno.

Con los antecedentes mencionados podría pensarse en métodos de optimización experimental para manejar los nutrientes en el maíz. No obstante, son escasas o prácticamente inexistentes las publicaciones que evidencian el uso de procedimientos en los que se apliquen integralmente todas las fases de métodos como el de superficie de respuesta (MSR) en la agricultura. Esto se

debe a que en estos estudios es necesario hacer, secuencialmente, corridas experimentales en condiciones homogéneas (Gutiérrez & De la Vara, 2008; Montgomery, 2004), un requisito de difícil cumplimiento para los experimentos agrícolas, pues las condiciones de los suelos y/o de los climas cambian sustancialmente (Kuehl, 2001). La facilidad con que la fertilidad de los suelos agrícolas difiere en el tiempo y en el espacio, así como la diversidad de las fuentes de variabilidad que tienen los experimentos en agricultura, harían imprácticos los resultados “óptimos” que se obtendrían con la aplicación del MSR. Además, los fundamentos exploratorios de este método —empezar con arreglos factoriales 2^K (Gutiérrez & De la Vara, 2008)— no compensan los costos importantes que demandan los experimentos en agricultura.

No obstante, existen varias alternativas de arreglos experimentales para buscar respuestas máximas en el estudio de los factores cuantitativos, en especial de los que tienen relación con los fertilizantes. En este sentido, dado que los arreglos factoriales, con todas sus combinaciones (factorial completo), son inmanejables por los costos y el control del error experimental de las condiciones edafo-climáticas, se han propuesto los experimentos factoriales incompletos, en los cuales se corre solo una parte de estos (Cochran & Cox, 1990).

Entre estas propuestas se encuentran el arreglo factorial San Cristóbal o los arreglos Plan Puebla, utilizados en ensayos de fertilizantes en caña de azúcar, tomate y plátanos (Castro & Huerta, 2015; Pineda, 2001; Tineo et al., 2019). Sin embargo, si se analizan a la luz del criterio de la varianza integrada promedio de la respuesta estimada, se encuentra que son arreglos factoriales poco eficientes (Briones-Encinia & Martínez-Garza, 2002), debido específicamente a la falta de rotabilidad que presentan sus estructuras. Además, estos diseños factoriales se han establecido para considerar tratamientos testigos que, en la práctica, dada la explotación continuada de los suelos agrícolas que los mantienen con pobres niveles de fertilidad, no tendrían un aporte en la definición de espacios experimentales que contengan las máximas respuestas de los cultivos.

Si bien los resultados de la aplicación restringida del MSR en los experimentos agronómicos no tienen una utilidad práctica (Piepho & Edmondson, 2018), en estos se utiliza un tipo de arreglo factorial conocido como *diseño central compuesto* (DCC), que, a pesar de que se emplea exclusivamente en el ámbito industrial (Gutiérrez & De la Vara, 2008), tiene características que podrían ajustarse muy bien a las condiciones en las que se desarrollan estos ensayos, especialmente en aquellos que evalúan fertilizantes (Mwangi et al., 2019). Este tipo de arreglo es uno de los más aplicados y eficientes para el ajuste de modelos de segundo orden (Gutiérrez & De la Vara, 2008; Montgomery, 2004; Piepho & Edmondson, 2018), de manera que es utilizado ampliamente para identificar espacios experimentales en los cuales se circunscriben los tratamientos con respuestas óptimas.

Las bondades del DCC radican en el aspecto económico y en la eficiencia. Aunque este diseño es un factorial incompleto, permite explorar las zonas experimentales de manera más uniforme debido a su característica de rotabilidad (Cochran & Cox, 1990), que hace posible reducir el número de combinaciones factoriales (tratamientos) para experimentos con tres o más factores en un número significativamente menor del que se producirían en un factorial completo (Asadzadeh et al., 2018). Precisamente, la rotabilidad es uno de los aspectos que le confieren eficiencia al diseño y lo hacen superior a los arreglos factoriales antes mencionados, pues hace

que la varianza del error experimental se mantenga invariante y que sea independiente de los espacios entre puntos de corridas (tratamientos) dentro de una zona experimental. Así, al final, favorece una mejor interpretación de los parámetros estimados del modelo de segundo orden que con él se utilice (Gutiérrez & De la Vara, 2008; Salvatori et al., 2018).

Ante las condiciones mencionadas, se propuso llevar a cabo el experimento para maíz que presentamos en este artículo, en el cual se evalúa simultáneamente el efecto del nitrógeno, del fósforo y del potasio en el rendimiento de grano seco. Para ello se empleó el DCC como diseño de tratamientos experimentales, con el fin de establecer los intervalos (región del espacio experimental de los factores) en las dosis de los nutrientes mencionados que obtengan las máximas respuestas en el rendimiento de maíz.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

Este ensayo se llevó a cabo entre los meses de agosto y diciembre del año 2019 en el cantón Alfredo Baquerizo Moreno, de la provincia del Guayas en Ecuador, ubicado en las coordenadas UTM (17M) 663716 este y 9783660 norte. Se desarrolló en época seca sobre un suelo de textura franco-arcillosa, con un pH de 6,9 y en condiciones de contenidos bajos para nitrógeno y altos para fósforo y potasio, de acuerdo con el reporte del análisis de suelo realizado en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador.

El suelo sobre el cual se desarrolló el experimento está clasificado dentro del orden de los Inceptisoles y asignado dentro del suborden Udepts, según el Sistema de Clasificación e Interpretación de Levantamientos de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica [SIGTIERRAS], 2017). Las condiciones climáticas medias del sitio en cuanto a temperatura mínima y máxima son de 21,1 °C y 29,7 °C, respectivamente; 82 % de humedad relativa; 1,1 m/s de velocidad del viento; 2,3 horas/día de insolación, y 1.800 mm de lluvia/año (FAO, 2021).

Diseño de tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron considerando las combinaciones de los factores nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), con un diseño central compuesto (DCC). En este caso, el número de tratamientos (N_t) generados se obtuvo del factorial 2^k , más las corridas axiales $2k$ y las corridas centrales n_c . Esto permitió ajustar directamente el DCC como modelo de segundo orden (Box et al., 2008). Asimismo, con el criterio de que los puntos experimentales se distribuyan uniformemente dentro de la región experimental analizada, se buscó que el diseño de tratamientos tenga rotabilidad, ante lo cual la distancia experimental (α) de los tratamientos axiales se obtuvo mediante la expresión $\alpha = (2^k)^{1/4}$ (Montgomery, 2004), de la cual se definió el valor de 1,682 en la codificación de los niveles. Los niveles seleccionados y los tratamientos

generados con estas consideraciones se detallan en las tablas 1 y 2, respectivamente. Las dosis bajas y altas de N, P y K se establecieron considerando la información de la zona en cuanto a las dosificaciones de aplicación común, además de las recomendaciones dadas por Amores et al. (1995) y Bertsch (1998) en cuanto al manejo de la fertilización en maíz.

Tabla 1. Niveles factoriales evaluados (kg/ha) en el cultivo de maíz híbrido Advanta 9313

Factores	Niveles	
	Bajo (-1)	Alto (+1)
Nitrógeno (N)	80	160
Fósforo (P ₂ O ₅)	40	80
Potasio (K ₂ O)	80	160

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Arreglo factorial en el DCC con sus niveles y sus correspondientes valores codificados

N.º	Variables (factores)			Variables codificadas		
	N	P	K	X ₁	X ₂	X ₃
1	80	40	80	-1	-1	-1
2	160	40	80	+1	-1	-1
3	80	80	80	-1	+1	-1
4	160	80	80	+1	+1	-1
5	80	40	160	-1	-1	+1
6	160	40	160	+1	-1	+1
7	80	80	160	-1	+1	+1
8	160	80	160	+1	+1	+1
9	52,7	60	120	-1,682	0	0
10	187,3	60	120	+1,682	0	0
11	120	26,4	120	0	-1,682	0
12	120	93,6	120	0	+1,682	0
13	120	60	52,7	0	0	-1,682
14	120	60	187,3	0	0	+1,682
15	120	60	120	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Los tratamientos indicados en la tabla 2 se evaluaron en campo con una distribución de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Esto permitió tener un total de 45 parcelas (unidades experimentales), cada una de las cuales tuvo una dimensión de 3,6 m de ancho y 7,0 m de largo. Las semillas fueron sembradas a 0,9 m entre hileras y 0,25 m entre ellas, con el fin de obtener un total de 112 plantas por parcela. Finalmente, en la parte central de la parcela se seleccionaron 40 plantas (9,0 m²) como unidad de muestreo.

Material vegetal utilizado

La semilla de maíz utilizada fue el híbrido Advanta 9313, que, según su distribuidor comercial, tiene un potencial de producción de 10 t/ha, una duración de 5 a 6 días para la emergencia y de 54 a 55 días a la floración. Sus mazorcas tienen entre 18 a 20 hileras de granos, con 35 a 45 granos por hilera, siendo estos cristalinos y de color amarillo-naranja. La planta tiene una altura promedio de 2,8 m y la inserción de mazorca entre 1,25 a 1,30 m.

Manejo agronómico del cultivo

Los fertilizantes utilizados, según los macronutrientes evaluados, fueron urea (46 % N), fosfato diamónico (46 % de fósforo como P₂O₅) y muriato de potasio (60 % de potasio como K₂O). En el caso de las dosis de nitrógeno, estas fueron fraccionadas en dos partes: la mitad de ellas fue aplicada a los 15 días después de la siembra, mientras que la segunda mitad restante de estas se aplicó a los 40 días de la siembra. En cuanto al fósforo y al potasio, estos se adicionaron en una sola aplicación con la primera parte del nitrógeno.

Como parte del manejo agronómico del cultivo, se realizaron controles de malezas de forma mecánica y de plagas mediante controles químicos a base de Imidacloprid (0,1 L/ha), Clorantropirrol (0,3 L/ha) y Clorpirifos (4E: 0,75 L/ha). A los 45 días desde la siembra y de forma preventiva de la mancha de asfalto, se aplicó Metominostrobin (Sumirobin 20 SC: 1,0 L/ha). El riego se suministró por surcos, descargándose un volumen total de 500 m³ para el área de ensayo, el cual fue definido mediante la relación de la demanda hídrica establecida por el método de la tina de evaporación clase A (FAO, 2006) y una eficiencia de 0,65 (Grassi, 1998). Además fue distribuido en 10 aplicaciones en todo el ciclo.

Variable respuesta

A los 126 días desde la siembra se valoró el rendimiento de grano seco a partir de 10 plantas seleccionadas al azar y su resultado fue extrapolado a la unidad de kg/ha. Dada la variabilidad en el contenido de humedad de los granos, cabe indicar que el rendimiento R de cada una de las unidades experimentales fue ajustado (R_{aj}) al 12 % con ayuda de la ecuación 1, en la cual h_0 se consideró como humedad inicial y h_f como la humedad de ajuste (12 %). Los valores de h_0 se obtuvieron con un medidor de humedad para granos, marca Amtast, modelo GM015.

$$R_{aj} = \frac{R(100-h_0)}{100-h_f} \quad \text{Ecuación 1}$$

Análisis estadístico de la información

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó Microsoft Excel en la tabulación y Minitab versión 19.0 (de prueba) en los análisis. Con estas herramientas se obtuvo, en primer lugar, un análisis de varianza (ANOVA) considerando efectos lineales y cuadráticos, así como las interacciones dobles de los factores. Con la información del ANOVA se validó un modelo de segundo orden para los tres nutrientes (factores) evaluados, con los componentes del modelo

que presentaron efecto significativo (García, 2012) y las gráficas de superficie de respuesta para cada combinación bi-factorial.

Resultados y discusión

Rendimiento obtenido

Los rendimientos obtenidos en cada una de las parcelas experimentales se pueden observar en la tabla 3. El rango de variabilidad entre todos los promedios de cada combinación factorial fue de 1.082,3 kg/ha de maíz; con un mínimo entre los datos de 8.316,5 kg/ha y un máximo de 11.005,7 kg/ha. Si bien son niveles de producción significativos para la zona, la magnitud de los resultados se debe, por una parte, al manejo estrictamente homogéneo y apegado a principios de la experimentación que deben cumplir los ensayos (Ravindra et al., 2016), el cual difiere del manejo comercial, y, por otra, a la respuesta superior que en algunos casos tienen los híbridos de maíz en comparación con las variedades locales, debido a su menor susceptibilidad al ataque de plagas (Mubeen et al., 2017) y al mejor aprovechamiento de los fertilizantes químicos (Kogbe & Adediran, 2003).

Tabla 3. Rendimientos de grano de maíz híbrido Advanta 9313 (kg/ha) con ajuste al 12 % de humedad

N.º	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Potasio (kg/ha)	Repeticiones			Promedios	Test Shapiro-Wilk (valor p)
				I	II	III		
1	80	40	80	8.711,1	9.438,3	8.316,5	8.821,9	0,6920
2	160	40	80	8.733,1	9.612,4	9.604,9	9.316,8	0,0135
3	80	80	80	10.010,2	9.372,8	9.419,8	9.600,9	0,1263
4	160	80	80	9.305,2	8.660,2	9.094,4	9.019,9	0,6204
5	80	40	160	9.003,6	8.520,1	9.452,3	8.992,0	0,9568
6	160	40	160	9.910,0	9.071,7	8.835,6	9.272,4	0,3985
7	80	80	160	9.721,6	8.382,7	9.494,4	9.199,6	0,3025
8	160	80	160	8.925,5	9.025,4	9.083,1	9.011,3	0,7044
9	52,7	60	120	8.839,6	8.593,8	8.975,4	8.802,9	0,6823
10	187,3	60	120	9.337,6	9.636,7	9.935,0	9.636,4	>0,999
11	120	26,4	120	9.361,1	9.985,1	10.173,4	9.839,8	0,4239
12	120	93,6	120	9.128,5	9.673,1	9.134,3	9.312,0	0,0192
13	120	60	52,7	9.588,1	9.518,0	8.498,0	9.201,4	0,1101
14	120	60	187,3	9.997,7	10.374,7	8.835,6	9.736,0	0,4513
15	120	60	120	10.569,3	10.235,7	11.005,7	10.603,6	0,8549
Mínimo							8.802,9	
Máximo							10.603,6	
Promedio general							9.357,8	
Valor p de acuerdo con la prueba de homocedasticidad de Levene							0,1105	

Fuente: Elaboración propia

Cumplimiento de supuestos para el análisis estadístico del modelo de segundo orden

Es importante verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los errores absolutos de los datos para la aplicabilidad de estadígrafos paramétricos (Gutiérrez & De La Vara, 2008). La información obtenida en el experimento (tabla 3) cumple con el supuesto de normalidad dado por la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), con excepción de las combinaciones 2 y 12, las cuales presentan significancia ante esta prueba. Sin embargo, considerando lo reducido del tamaño muestral de cada combinación (apenas tres repeticiones por tratamiento) y que comparativamente son solo dos de estas combinaciones, cuya dispersión no es relativamente importante, se puede dar por cierto el cumplimiento de normalidad (Montgomery, 2004).

En el caso del requerimiento de igualdad de varianzas en los residuos, valorado por la prueba de Levene, los datos se ajustan a este supuesto ($p > 0,05$). Finalmente, la independencia de los errores se asumió como cierta, dado que se cumplió con el principio de aleatorización (Balzarini et al., 2011) en la asignación de los tratamientos (combinaciones) a las parcelas experimentales.

Análisis del ajuste del modelo de segundo orden aplicado al diseño central compuesto

El ANOVA correspondiente a los datos de la tabla 3 se detalla en la tabla 4. De acuerdo con esta herramienta estadística, se pudo establecer efectos cuadráticos significativos ($p < 0,05$) de cada nutriente evaluado, lo cual evidencia la respuesta máxima del cultivo en cuanto a la producción. No obstante, esta significancia fue irrelevante en la interacción de las combinaciones de dichos elementos, es decir, cada uno de ellos tiene una acción independiente en la capacidad de producción del cultivo. Asimismo, al valorar la magnitud del cuadrado medio del error experimental del ensayo (MC ajust EE) respecto del comportamiento medio de la variable, se puede afirmar que la información generada tiene la confianza necesaria, dada la pequeña magnitud del coeficiente de variación que presentan los datos (5,3 %), la cual respalda el manejo homogéneo que tuvo el ensayo (De La Loma, 1966; Reyes, 1984).

Las respuestas cuadráticas del rendimiento como efecto de los elementos aplicados al cultivo pueden observarse en las figuras 1, 2 y 3. La dinámica del comportamiento que se obtuvo en cuanto al rendimiento justifica el hecho de que el híbrido empleado se encuentra adaptado a la zona y el rango de las dosis se han seleccionado de acuerdo con el potencial de la semilla (González et al., 2016), de allí que los datos se hayan ajustado adecuadamente al arreglo experimental utilizado y su rotabilidad haya permitido delimitar el punto de respuesta máxima del cultivo en el sitio (Gutiérrez & De La Vara, 2008).

La respuesta cuadrática del rendimiento responde al hecho de que este no tiene una pendiente constante en los cultivos, lo cual revela que existe una condición máxima que no es proporcional a la aplicación de nutrientes (Gárate & Bonilla, 2008). En este contexto, los modelos de regresión cuadrática o de segundo orden se ajustan muy bien para explicar el comportamiento del rendimiento a las dosificaciones crecientes de nutrientes (Bernal et al., 2014), cuya elaboración es comúnmente facilitada por los diseños de tratamientos como el central compuesto (Montgomery, 2004).

Tabla 4. Análisis de varianza para efectos lineales, cuadráticos y de interacción factorial en el cultivo de maíz híbrido Advanta 9313

Fuente	GL	SC* Ajust.	MC Ajust.**	Valor F	Valor p
Modelo	11	7400266	672751	2,54	0,019
Lineal	5	626878	125376	0,47	0,793
Nitrógeno (kg/ha)	1	435431	435431	1,64	0,209
Fósforo (kg/ha)	1	46348	46348	0,17	0,678
Potasio (kg/ha)	1	83064	83064	0,31	0,579
Bloques	2	62035	31017	0,12	0,890
Cuadrado	3	5759314	1919771	7,25	0,001
Nitrógeno (kg/ha)*Nitrógeno (kg/ha)	1	5316581	5316581	20,07	0,000
Fósforo (kg/ha)*Fósforo (kg/ha)	1	3129901	3129901	11,81	0,002
Potasio (kg/ha)*Potasio (kg/ha)	1	3727546	3727546	14,07	0,001
Interacción de 2 factores	3	1014074	338025	1,28	0,299
Nitrógeno (kg/ha)*Fósforo (kg/ha)	1	894555	894555	3,38	0,075
Nitrógeno (kg/ha)*Potasio (kg/ha)	1	11931	11931	0,05	0,833
Fósforo (kg/ha)*Potasio (kg/ha)	1	107589	107589	0,41	0,528
Error	33	8742319	264919		
Total	44	16142585			

* SC Ajust: suma de cuadrados ajustada.

** MC Ajust: cuadrado medio ajustado.

Fuente: Elaboración propia

Intervalos de rendimientos máximos observados en las gráficas de superficie de respuesta

En la figura 1 se han combinado los elementos nitrógeno y fósforo para generar tanto una superficie de respuesta como un gráfico de contornos para distintos rangos de rendimiento del cultivo. Según esta figura, los rendimientos máximos de maíz en una hectárea se logran cuando se aplica nitrógeno entre 110 a 140 kg/ha y fósforo entre 50 y 70 kg/ha.

Asimismo, la figura 2 se generó combinando los elementos nitrógeno y potasio. Esta combinación también presenta efectos cuadráticos que pueden visibilizarse en la superficie de respuesta obtenida. En este caso, según la gráfica de contornos de esta misma figura, los rendimientos máximos de maíz también ocurren cuando las dosis de nitrógeno oscilan entre 110 y 140 kg/ha; mientras que este rango para el potasio está entre 100 a 140 kg/ha.

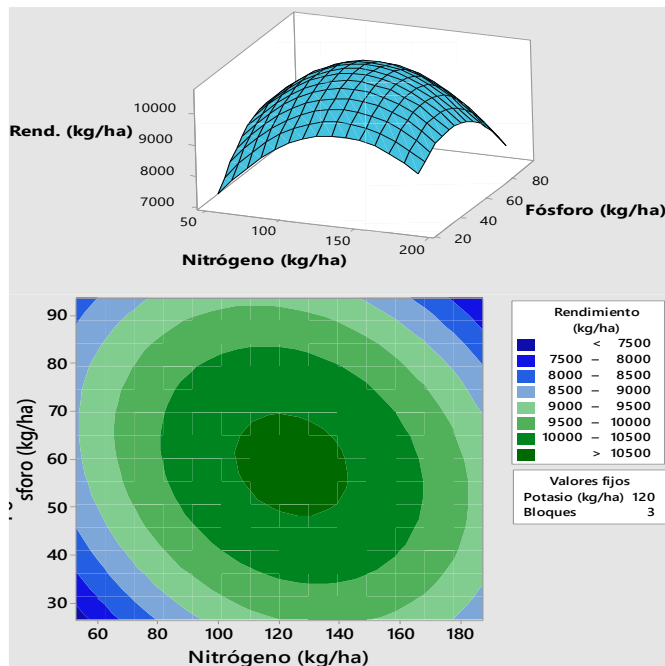


Figura 1. Superficie de respuesta y gráfica de contorno entre nitrógeno y fósforo en maíz.
Fuente: Elaboración propia

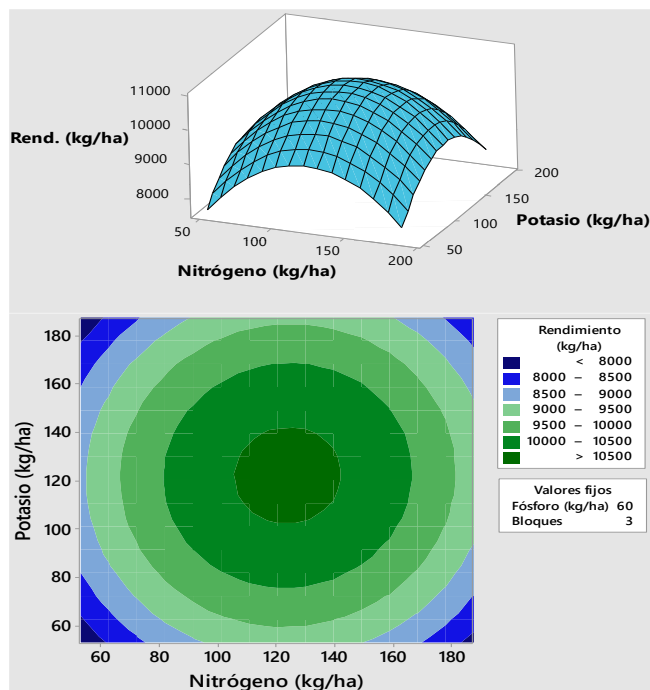


Figura 2. Superficie de respuesta y gráfica de contorno entre nitrógeno y potasio en maíz.
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la figura 3 los niveles de potasio y fósforo en la curvatura que forma la combinación de estos elementos en la gráfica de superficie de respuesta sugieren la ubicación de un rendimiento máximo del cultivo. Complementariamente, en la gráfica de contornos de la figura 3 se puede deducir que el mayor rendimiento podría lograrse al adicionar entre 50 y 70 kg/ha de fósforo y de 100 a 140 kg/ha de potasio.

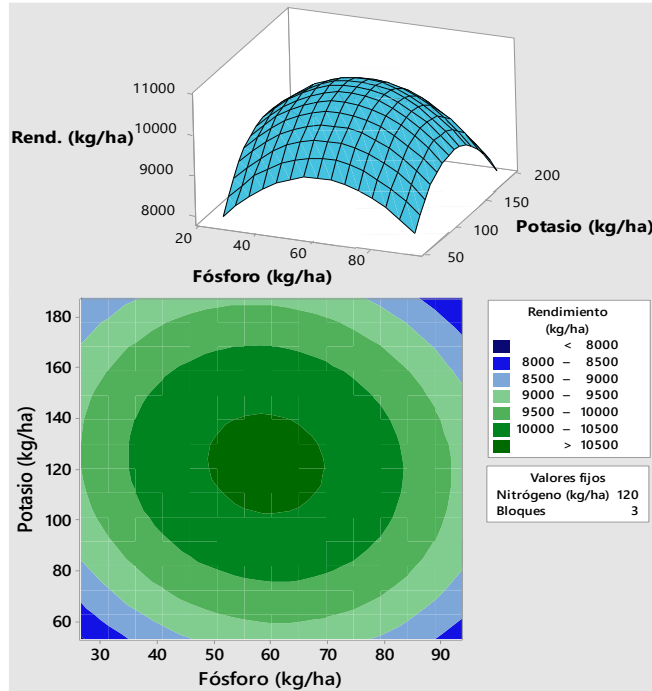


Figura 3. Superficie de respuesta y gráfica de contorno entre fósforo y potasio en maíz.
Fuente: Elaboración propia

Con base en lo indicado en las figuras 1, 2 y 3, se observó que los rendimientos máximos de grano seco de maíz, según el híbrido utilizado en el sitio de estudio, se producen cuando se aplican de 110 a 140 kg/ha de nitrógeno, de 50 a 70 kg/ha de fósforo y de 100 a 140 kg/ha de potasio. Estos resultados son distintos a los reportados por El-Rouby et al. (2021), quienes definieron un rendimiento máximo con las dosis de 270 kg/ha de N, 34,5 kg/ha de P₂O₅ y 100 kg/ha K₂O, atribuidos a la distinta condición edafo-climática en que desarrollaron su ensayo y posiblemente a la expresividad genética de la semilla que utilizaron. No obstante, estos resultados se ajustan a las recomendaciones dadas por Amores et al. (1995) para las zonas maiceras del Ecuador.

Es importante destacar el hecho de que en alguna medida la condición textural del suelo sobre el cual se llevó a cabo este experimento permitió un mejor uso eficiente de los nutrientes (González et al., 2016), así como lo hizo la capacidad intrínseca de los híbridos, que en algunos casos les permite aprovechar de mejor manera la fertilización sintética respecto de las variedades locales (Kogbe & Adediran, 2003; McRobert et al., 2015).

Análisis de maximización y modelo de segundo orden ajustado

El resultado de la maximización del rendimiento del cultivo, según los niveles mínimos y altos de los fertilizantes aplicados, se puede observar en la figura 4. En este caso, para un rendimiento máximo ajustado por el software de 10.648,0 kg/ha de grano seco de maíz, las dosificaciones de nitrógeno, fósforo y potasio deben ser de alrededor de 124 kg/ha, 60 kg/ha y 122 kg/ha, respectivamente. Dosificaciones que si bien no se ajustan a las reportadas por El-Rouby et al. (2021), son similares en cuanto a la menor demanda relativa de P₂O₅, lo cual resalta la mayor importancia de N y K₂O en la fertilización con macronutrientes referida por estos autores. Asimismo, estos resultados permiten deducir ratios de 85,5 kg grano/kg N, 177,5 kg grano/kg P₂O₅ y 87,3 kg grano/kg K₂O, muy superiores a los reportados por Kogbe y Adediran (2003). Además, al ser dosificaciones que se establecieron sin tomar en cuenta los remanentes en el suelo, pueden verse como valores aproximados para la sostenibilidad de la fertilidad edáfica en el sitio de estudio (Ten Berge et al., 2019).

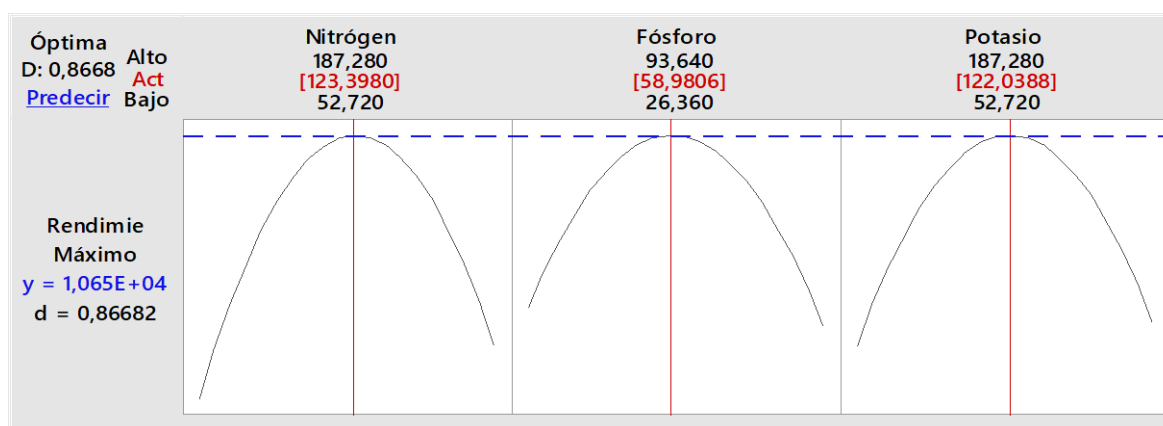


Figura 4. Resultados de la maximización de cada nutriente.

Fuente: Elaboración propia

De manera correspondiente a las significancias reveladas en el ANOVA de cada fuente de variabilidad (tabla 4) y considerando también los efectos de mayor importancia de cada coeficiente de regresión del modelo total obtenido mediante la prueba T de Student (Piepho & Edmondson, 2018), además de verificar el mejor coeficiente de determinación ajustado (García, 2012), el modelo ajustado para el rendimiento del cultivo (Y) dado en unidades de kg/ha para nitrógeno (x_1), fósforo (x_2) y potasio (x_3) se presenta en la ecuación 2.

$$Y = -4123 + 98,2x_1 + 151,8x_2 + 69,1x_3 - 0,338x_1^2 - 1,038x_2^2 - 0,283x_3^2 - 0,241x_1x_2$$

Ecuación 2

Si bien en este modelo no se han incluido todas las interacciones dobles, incluye el efecto de curvatura de los tres nutrientes evaluados sobre el rendimiento (El-Rouby et al., 2021). De esta manera, el modelo responde al uso del DCC (Box et al., 2008; Montgomery, 2004; Piepho & Edmondson, 2018) como diseño de segundo orden para detectar puntos de respuesta máxima.

Conclusiones

En el sitio de estudio y en las condiciones en las cuales se llevó a cabo el ensayo, el maíz híbrido Advanta 9313 puede alcanzar rendimientos de entre 10 y 11 kg/ha de grano seco si se aplican dosis de fertilizantes que estén entre 110 y 140 t/ha de nitrógeno, de 50 a 70 kg/ha de fósforo y de 100 a 140 kg/ha de potasio; siempre que se asistan con las demandas de cumplimiento adecuadas de los demás factores de producción que exigen las semillas de calidad. También se verificó la bondad del DCC como diseño de tratamientos para establecer respuestas máximas de rendimiento en un experimento de maíz, cuando se conoce la región de operatividad de los factores de estudio.

Agradecimientos

A la Universidad Agraria del Ecuador por el apoyo brindado en la investigación y al señor José Gómez, propietario de la hacienda “Nueve Hermanos”, por las facilidades prestadas durante el desarrollo de este experimento en cuanto a las parcelas utilizadas y su manejo en el campo.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Amores, F., Mite, F., & Carrillo, M. (1995). *Manejo de la fertilización en maíz duro* [Manual Técnico N.º 28]. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1632>
- Asadzadeh, F., Maleki-Kaklar, M., Soiltanlinejad, N., & Shabani, F. (2018). Central composite design optimization of zinc removal from contaminated soil, using citric acid as biodegradable chelant. *Scientific Reports*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20942-9>
- Balzarini, M., Di Rienzo, J., Tablada, M., González, L., Bruno, C., Córdoba, M., Robledo, W., & Casanoves, F. (2011). *Introducción a la bioestadística: Aplicaciones con InfoStat en agronomía*. Universidad Nacional de Córdoba. https://www.researchgate.net/profile/Monica-Balzarini/publication/283491258_Introduccion_a_la_bioestadistica_aplicaciones_con_InfoStat_en_agronomia/links/5654bf8e08ae4988a7b070c3/Introduccion-a-la-bioestadistica-aplicaciones-con-InfoStat-en-agronomia.pdf
- Bernal, J., Navas, G., & Hernández, R. (2014). Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de sabanas ácidas de Colombia. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 15, 6-10. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C6F375AA0EFCEB5285257D550063E573/\\$FILE/6.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C6F375AA0EFCEB5285257D550063E573/$FILE/6.pdf)

- Bertsch, F. (1998). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Bonilla, I. (2008). Nutrición mineral y producción vegetal. En J. Azcón-Bieto, & M. Talón, (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (pp. 106-108). McGraw Hill Interamericana.
- Box, G., Hunter, J., & Hunter, W. (2008). *Estadística para investigadores: Diseño, innovación y descubrimiento* (2.^a ed.). Reverté.
https://www.academia.edu/34386593/Estad%C3%ADstica_para_Investigadores_Segunda_edici%C3%B3n_Dise%C3%B1o_innovaci%C3%B3n_y_descubrimiento
- Briones-Encinia, F., & Martínez-Garza, A. (2002). Eficiencia de algunos diseños experimentales en la estimación de una superficie de respuesta. *Agrociencia*, 36(2), 201-210.
<https://www.redalyc.org/pdf/302/30236207.pdf>
- Buckman, H., & Brady, N. (1985). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
- Castro, S., & Huerta, A. (2015). Respuesta de variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) a la fertilización NPK bajo secano en el sur de Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 2225-2232. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.804>
- Caviedes, M. (2019). Producción de semilla de maíz duro en el Ecuador: Retos y oportunidades. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 11(1), 116-123.
<http://dx.doi.org/10.18272/aci.v11i1.1100>
- Cochran, W., & Cox, G. (1990). *Diseños experimentales* (2.^a ed.). Trillas.
<https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=5068>
- De La Loma, J. (1966). *Experimentación agrícola*. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
<http://unag2.metabiblioteca.com.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4026>
- Dias, R., Quintão, R., Mageste, J., Neres, G., & Martins, M. (2020). Phosphate organomineral fertilizer usage compared to mineral phosphate in corn cultivation. *Journal of Agricultural Science*, 12(7), 92-104.
<https://pdfs.semanticscholar.org/c727/6bac7eb6a99a4ed5a4d172992bf443e71388.pdf>
- Díaz-López, E., Loeza-Corte, J., Campos-Pastelín, J., Morales-Rosales, E., Domínguez-López, A., & Franco-Mora, O. (2013). Eficiencia en el uso de la radiación, tasa de asimilación neta e integral térmica en función del fósforo en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia*, 47(1), 135-146. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n2/v47n2a3.pdf>
- El-Rouby, M., Omar, N., Nawar, A., El-Shafei, A., & Zacaria, O. (2021). Determination of grain yield inputs of the maize hybrid Giza 168 using a Six-Factor Central Composite Design in Mediterranean regions under irrigation. *Journal of Desert and Environmental Agriculture*, 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.21608/JDEA.2021.51532.1002>
- Garate, A., & Bonilla, I. (2008). Nutrición mineral y producción vegetal. En J. Azcón-Bieto, & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (pp. 143-164). McGraw Hill Interamericana. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=556962>
- García, R. (2012). *Inferencia estadística y diseño de experimentos*. Editorial Universitaria de Buenos Aires.
<https://www.eudeba.com.ar/Papel/9789502312958/Inferencia+estad%C3%ADstica+y+dise%C3%B1o+de+experimentos>
- González, A., Figueroa, U., Preciado, P., Núñez, G., Luna, G., & Antuna, O. (2016). Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 301-309.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n2/2007-0934-remexca-7-02-00301-en.pdf>

- Grassi, C. (1998). *Fundamentos del riego*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.
https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC]. (2018). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2018*. INEC; ESPAC.
https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2018/Presentacion%20de%20principales%20resultados.pdf
- Izquierdo, N., & Cirilo, A. (2013). *Usos del maíz: Efectos del ambiente y del manejo sobre la composición del grano* [Ponencia]. Jornada de Actualización: Calidad del grano de maíz para la industria y la producción de bovinos. Balcarce, Argentina.
<https://core.ac.uk/download/pdf/301064904.pdf>
- Kogbe, J., & Adediran, J. (2003). Influence of nitrogen, phosphorus and potassium application on the yield of maize in the savanna zone of Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 2(10), 345-349. <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/13EDC5B10231>
- Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos*. Thomson Editores.
- Lascano-Ferrat, I. (2006). *El potasio y el concepto de la fertilización balanceada* [Extracto de la ponencia presentada en la Conferencia Regional para México y el Caribe de la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes].
https://www.researchgate.net/profile/ignacio_lazcano-ferrat/publication/238736443_el_potasio_y_el_concepto_de_la_fertilizacion_balanceada/links/56e32cb108ae65dd4cbac2f9/el-potasio-y-el-concepto-de-la-fertilizacion-balanceada.pdf
- McRobert, J., Setimela, P., Gethi, J., & Worku, M. (2015). *Manual de producción de semilla de maíz híbrido*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
<https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/16849/57179.pdf?sequence=1>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (2.ª ed.). Limusa Wiley.
https://www.academia.edu/9101936/Dise%C3%B1o_y_an%C3%A1lisis_de_experimentos_Douglas_C_Montgomery
- Mubeen, S., Rafique, M., Hussain, M., & Chaudhary, H. (2017). Study of southern corn leaf blight (SCLB) on maize genotypes and its effect on yield. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(3), 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.06.006>
- Mwangi, I., Miano, M., & Macharia, L. (2019). Optimization of yields and yield components of sweet potatoes (*Ipomea batatas* (L.) Lam) using organic manure and phosphate fertilizer. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 5(4), 1-13.
<https://doi.org/10.9734/AJPAS/2019/v5i430142>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2016). *Maíz, arroz y trigo: Guía para la producción sostenible de cereales*. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i4009s.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2021). CLIMWAT 2.0 [Base de datos]. <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/>
- Piepho, H., & Edmondson, R. (2018). A tutorial on the statistical analysis of factorial experiments with qualitative and quantitative treatment factor levels. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(5), 429-455. <https://doi.org/10.1111/jac.12267>
- Pineda, Q. (2001). Efecto de diferentes niveles de N, P y K en plátano Hartón (*Musa AAB Simmonds*) en el valle medio del río Sinú, Montería (Colombia). En D. Cayón, & F. Salazar (Eds.), *Resúmenes analíticos sobre la investigación de plátano en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13122>
- Ravindra, B., Sumathi, P., & Mohan, G. (2016). Planning and application of statistical techniques in agricultural experimentation. *Andhra Pradesh Journal of Agricultural Sciences*, 2(2), 130-134. <https://sasapjas.org/wp-content/uploads/2019/01/09-5.pdf>
- Reyes, P. (1984). *Diseño de experimentos aplicados: Agronomía, biología, química, industrias, ciencias sociales, ciencias de la salud*. Editorial Trillas. <https://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000000929>
- Sadeghi, S., Noorhosseini, S., & Damalas, C. (2018). Environmental sustainability of corn (*Zea mays* L.) production on the basis of nitrogen fertilizer application: The case of Lahijan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95(1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.005>
- Salvatori, P., Sánchez, G., Lombardi, A., Nicocia, E., & Boschetti, C. (2018). Estrategia para la optimización de un compuesto de caucho con aceite de soja utilizando diseños de experimentos. *Matéria*, 23(2), 1-10. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0416>
- Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica [SIGTIERRAS]. (2017). Mapa de órdenes de suelos del Ecuador [Mapa digital]. <http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/>
- Ten Berge, H., Hijbeek, R., Van Loon, M., Rurinda, J., Tesfaye, K., Zingore, S., Craufurd, P., Van Heerwaarden, J., Brentrup, F., Schröder, J., Boogaard, H., Groot, H., Ittersum, M. (2019). Maize crop nutrient input requirements for food security in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, 23, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.02.001>
- Tineo, A., Ayala, P., & Cabrera, C. (2019). Diseño de superficie para determinar los niveles de N y P que maximizan el rendimiento de tomate. *Investigación Agraria*, 21(1), 31-42. <http://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2019.junio.31-42>