



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE GRANO EN MAÍZ

FERNANDO REYES GONZÁLEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: "MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE GRANO EN MAÍZ" realizada por el alumno: "FERNANDO REYES GONZÁLEZ" bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ARTURO GALVIS SPINOLA

ASESOR



DR. JUAN JOSÉ ALMARAZ SUÁREZ

ASESORA



DRA. TERESA MARCELA HERNÁNDEZ MENDOZA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2020.

MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE GRANO EN MAÍZ

Fernando Reyes González, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

El crecimiento de la población mundial conlleva a la demanda de alimentos, y estos se deben obtener mediante el uso eficiente de los recursos. Los modelos de simulación son una herramienta con la que se puede visualizar escenarios y cuantificar los insumos a usar. En el presente trabajo, con datos de los rendimientos máximos de maíz (R_G) de 1943 a 2017 obtenidos de experimentos de campo, se generó un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el rendimiento del grano en maíz (R_{GE}) y sirva de apoyo para la toma de decisiones del manejo del cultivo de maíz para grano. Las variables identificadas y cuantificadas fueron: densidad de población (D_P), dosis de potasio (K), lámina de riego (L_R), dosis de nitrógeno (N) y dosis de fósforo (P) y se usaron para generar el modelo con el método de regresión múltiple *stepwise*, y se expresó como: $R_{GE}=3.158205+0.693319 (D_P)-0.022246(K)+ 0.005990(L_R)+0.010687(N)+0.013794(P)$, tuvo un $R^2=0.73$ y un error estándar de 0.964 Mg ha^{-1} . La D_P fue la variable que explicó en mayor proporción el valor del R_{GE} , con el análisis de datos de R_G se observó el incremento de la tasa de siembra a través del tiempo para lograr una mayor D_P e incrementar el R_G , lo cual generó la demanda de insumos, el modelo expresó que el R_{GE} fue función de la D_P , K , L_R , N , y P .

Palabras clave: *Zea mays* L., densidad de población, nitrógeno.

MODEL FOR PREDICTING CORN GRAIN YIELD

Fernando Reyes González, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

The human population growth demands for food, which has to be obtained with an efficient use of resources. Simulation models are tools, which it could be used to visualize scenarios and quantify inputs to use. In the present research, with data of trials in which the highest corn grain yields (R_G) have been reached from 1943 to 2017, a multiple regression model was generated to estimate the corn grain yield (R_{GE}) and it could help to make decisions. Identified and quantified factors were: plant population (D_P), potassium rate (K), irrigation water (L_R), nitrogen rate (N) and phosphorus rate (P), and these were used to generate the model with the stepwise method, and it was expressed as: $R_{GE} = 3.158205 + 0.693319 (D_P) - 0.022246 (K) + 0.005990 (L_R) + 0.010687 (N) + 0.013794 (P)$ and reached a $R^2=0.73$ and a residual standard error of 0.964 Mg ha^{-1} . D_P was the most influenced variable to get R_{GE} , with the analysis of the R_G data base it was observed that seeding rates have been increasing to get higher D_P and increase R_G , this situation generated a demand for inputs, the multiple regression model expressed that R_{GE} was the function of D_P , K , L_R , N , and P .

Keywords: *Zea mays* L., plant population, nitrogen.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza para lograr mis metas de vida.

A mis padres, Lucía y Manuel M., por el amor incondicional que me brindan todos los días de mi vida.

A mi hermano Juan Manuel, por motivarme a seguir adelante.

A mis hermanas, Aracely y Elizabeth, que a pesar de la distancia siempre me han mostrado su apoyo.

Al Doctor Esteban Escamilla Prado, por su amistad y disposición en todo momento.

A los Doctores Enrique Hernández Leal, Petra Andrade Hoyos y a la Maestra Beatriz Martínez Yáñez, por su valiosa amistad y consejos, y por animarme a realizar estudios de postgrado.

A todas las personas que he conocido durante mi desarrollo académico y profesional, por brindarme su amistad y tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por darme la oportunidad de estudiar y recibir cursos con excelentes profesores.

Al Dr. Arturo Galvis Spinola, por todos los consejos que me brindó durante mis estudios de maestría, y su total disposición para realizar el presente trabajo de investigación.

A los Doctores Juan José Almaraz Suárez y Teresa Marcela Hernández Mendoza, por su disposición y las facilidades otorgadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A la Ing. María Elena Luna González, por su apoyo para la captura y revisión de los datos utilizados en la presente tesis.

A todas las personas que contribuyeron. en mi desarrollo profesional durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos particulares	2
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 Estudios sobre los factores que influyen en la respuesta del rendimiento de grano en maíz	4
4.2 Factores que influyen en la respuesta del rendimiento de grano en maíz	12
4.2.1 Agua	12
4.2.2 Suelo	13
4.2.3 Fertilización	15
4.2.4 Densidad de población	18
4.2.5 Cultivar	20
4.3 Modelos para la simulación del rendimiento en maíz	21
5. MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1 Selección de estudios	28
5.2 Extracción de datos	28
5.3 Variable dependiente	29
5.4 Análisis estadístico	29
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
6.1 Distribución espacial y temporal de los datos	32
6.2 Tendencias del rendimiento de grano de maíz de 1943-2017	32
6.2.1 Régimen hídrico	34
6.3 Análisis a través del tiempo de las variables del estudio identificadas	34
6.3.1 Variables estudiadas	35
6.3.1.1 Lámina de riego	35
6.3.1.2 Dosis de nitrógeno	36
6.3.1.2.1 Régimen hídrico y dosis de nitrógeno.....	37

6.3.1.3	Dosis de fósforo	38
6.3.1.3.1	Régimen hídrico y dosis de fósforo.....	39
6.3.1.4	Dosis de potasio	40
6.3.1.4.1	Régimen hídrico y dosis de potasio	40
6.3.1.5	Densidad de población.....	41
6.3.1.5.1	Régimen hídrico y densidad de población	42
6.3.1.6	Cultivar.....	43
6.3.2	Otras variables reportadas	44
6.3.2.1	Sistema de labranza	44
6.3.2.1.1	Régimen hídrico y sistema de labranza.....	44
6.3.2.2	Sistema de riego	45
6.3.2.3	Sistema de cultivo	46
6.3.2.3.1	Régimen hídrico y sistema de cultivo	46
6.3.3	Variables del sitio	47
6.3.3.1	Suelo.....	47
6.3.3.1.1	Régimen hídrico y suelo	48
6.4	Modelos propuestos.....	49
6.4.1	Modelo:.....	49
7.	CONCLUSIONES.....	52
8.	LITERATURA CITADA	53
	ANEXO.....	59

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de los datos de rendimiento de grano (R_G) del periodo (1943-2017).....	32
Cuadro 2. Clasificación de las variables cuantitativas estudiadas	35
Cuadro 3. Modelos propuestos para la predicción del rendimiento de maíz (R_{GE}).....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histograma de los rendimientos de grano de maíz (R_G).	33
Figura 2. Relación entre los años de estudio y el R_G ($P<0.01$).	33
Figura 3. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos ($P<0.01$).	34
Figura 4. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes láminas de riego ($P<0.01$).	36
Figura 5. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de N ($P<0.01$).	37
Figura 6. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de N ($P<0.01$).	38
Figura 7. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de P ($P<0.01$).	39
Figura 8. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de P ($P<0.05$).	39
Figura 9. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de K ($P<0.01$).	40
Figura 10. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de K ($P<0.01$).	41
Figura 11. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes densidades de población ($P<0.01$).	42
Figura 12. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y densidades de población ($P<0.01$).	43
Figura 13. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de labranza ($P<0.01$).	44
Figura 14. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y sistemas de labranza ($P<0.01$).	45
Figura 15. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de riego ($P<0.01$).	45
Figura 16. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de cultivo ($P<0.01$).	46

Figura 17. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de cultivo ($P < 0.01$).	47
Figura 18. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes suelos ($P < 0.05$).	48
Figura 19. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y suelos ($P < 0.01$).	48
Figura 20. Relación entre los datos observados y los estimados con el modelo. La línea punteada indica la relación 1:1 entre el valor observado (R_G) y el estimado (R_{GE}).	50

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda de alimentos debido al crecimiento poblacional mundial requiere mejorar la eficiencia en los procesos de producción, y usar de manera racional los recursos. Herramientas como los modelos de simulación, que se pueden utilizar para crear escenarios, en los cuales se pueden identificar y cuantificar los recursos necesarios en los procesos de producción, pueden ayudar a mejorar los sistemas de producción de alimentos.

Debido a la importancia económica del maíz como grano, se han planteado estrategias a nivel de parcela para alcanzar los más altos rendimientos. Mediante el uso de datos obtenidos de experimentos a nivel mundial y a través de los años (1943-2017), en los cuales se han alcanzado rendimientos máximos de grano en maíz, se identificaron y cuantificaron los factores que intervienen para lograr el rendimiento máximo de grano de maíz, a continuación, se propuso un modelo de regresión múltiple para la predicción del rendimiento de maíz en diferentes ambientes.

A través de este modelo, se puede predecir la cantidad de grano a cosechar de acuerdo a los recursos con los que cuente el productor. Se incluyó una explicación agronómica de la respuesta del rendimiento a los factores identificados y cuantificados, así como su evaluación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Discernir entre diferentes condiciones ambientales y de manejo, aquellas variables que más influyan sobre el R_G . Con base en ello, crear un modelo matemático para estimar el R_{GE} , aplicable en diferentes condiciones de producción.

2.2 Objetivos particulares

- Identificar y clasificar las variables que influyen para obtener el R_G .
- Evaluar la influencia de las variables de suelo, clima y manejo agronómico sobre el R_G .
- Generar un modelo matemático que permita estimar el R_{GE} , aplicable en diferentes condiciones de manejo, suelo y clima.

3. HIPÓTESIS

- El R_G es función de las condiciones ambientales y de manejo agronómico.
- Las variables de clima influyen de manera más significativa sobre el R_G , en comparación con las que componen el manejo agronómico.
- El R_G es consecuencia de la incidencia de múltiples variables, razón por la cual, el modelo de regresión múltiple permite estimar de manera más apropiada el R_{GE} para distintas condiciones ambientales y de manejo.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Estudios sobre los factores que influyen en la respuesta del rendimiento de grano en maíz

Voss *et al.*, (1970) estudiaron los factores que influyen en la respuesta del rendimiento de maíz a la fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y obtuvieron una ecuación de regresión múltiple para el rendimiento, ajustando datos de 575 parcelas que contenía 40 términos y que alcanzaron un $R^2=0.80$. Contenía interacciones entre la fertilización aplicada, la fertilidad nativa, el manejo y los factores climáticos. La respuesta al N aplicado fue la más influenciada por los cultivos anteriores y por el estrés por humedad del suelo. La respuesta al P aplicado no estuvo influenciada por los factores ambientales tanto como la respuesta al N aplicado, pero el P "disponible" del suelo, el N del suelo y la humedad del suelo influyeron en la respuesta del P. Los suelos que se clasificaron como "medianos" o "altos" en K intercambiable, respondieron solo de forma leve y negativa al fertilizante K aplicado. Encontraron interacciones significativas entre la humedad del suelo y la población de plantas, y entre la humedad del suelo y la fecha de siembra.

Karlen *et al.*, (1987) determinaron la tasa de acumulación de materia seca, N, P y K por el cultivo de maíz, concluyeron que, las prácticas culturales, las de nutrición y las de manejo del agua, deben coordinarse para proporcionar un ambiente de producción de mínimo estrés para un alto rendimiento en maíz.

Braimoh y Vlek (2006) investigaron las variables más importantes que afectan el rendimiento del maíz en el norte de Ghana. Combinaron un índice de calidad del suelo en una escala continua, con un conjunto de datos sociales para modelar el rendimiento del maíz mediante regresión lineal múltiple. Identificaron cinco variables significativas ($P<0.05$): índice de calidad del suelo, uso de fertilizantes, tamaño del hogar, distancia al principal mercado y la interacción entre la longitud del barbecho y el índice de calidad del suelo. El efecto de la interacción entre la calidad del suelo y el barbecho sobre el

rendimiento del maíz fue negativo, lo que sugirió la influencia de la calidad de la hojarasca y la inmovilización de N en los suelos. Además, sugieren que la investigación y las políticas deberían centrarse en el desarrollo de cultivos específicos para cada sitio, basados en leguminosas, y la integración de cultivos y ganadería en el norte de Ghana y áreas similares en África subsahariana.

Berzsenyi y Dang (2008) con el establecimiento de un experimento a largo plazo en Hungría en 1960, en un suelo franco del tipo chernozem, estudiaron el efecto de cinco factores de producción de cultivos en el aumento de los rendimientos de maíz. Los factores estudiados fueron: la labranza del suelo, la fertilización, la densidad de las plantas, la variedad y el control de malezas. Todos los factores tuvieron un nivel favorable y desfavorable. Los datos de rendimiento registrados durante 42 años se evaluaron mediante el análisis de varianza y el de estabilidad. El mayor rendimiento (8.59 t ha^{-1}) se obtuvo cuando todos los factores de producción fueron favorables y el más bajo (2.09 t ha^{-1}) cuando estos factores fueron desfavorables. Cuando solo un factor era desfavorable y todos los demás factores eran favorables, se obtuvieron los siguientes rendimientos (t ha^{-1}), labranza del suelo 8.32, fertilización 5.21, genotipo 4.98, densidad de plantas 6.31 y control de malezas 7.01. El valor más alto del coeficiente de variación (CV) se obtuvo cuando todos los factores de producción estaban en un nivel desfavorable (45.7%) y cuando el control de malezas o la fertilización eran desfavorables (36.6% y 34.8%, respectivamente), mientras que el valor más bajo se registró cuando todos los factores fueron favorables (19.5%). La interacción significativa “tratamiento-año” podría atribuirse principalmente a tratamientos en los que el control de malezas, la fertilización, el genotipo o todos los factores fueron desfavorables. El coeficiente de regresión del análisis de regresión lineal proporcionó una caracterización satisfactoria de la estabilidad de los tratamientos en diferentes entornos, mientras que la distancia entre las líneas rectas expresó las diferencias de rendimiento entre los pares de tratamientos. El modelo AMMI (Efecto Aditivo Principal e Interacción Multiplicativa) demostró ser un enfoque valioso para comprender las interacciones agronómicas de “tratamiento-ambiente”, evaluar el rendimiento medio y la estabilidad del rendimiento de los tratamientos.

Berzsenyi y Dang (2008) encontraron que los factores de producción del cultivo contribuyeron al aumento del rendimiento del maíz en las siguientes proporciones (%): fertilización 30.6, genotipo 32.6, densidad de plantas 20.2, control de malezas 14.2 y cultivo del suelo 2.4.

Subedi y Ma (2009) realizaron un experimento durante 3 años en Ottawa, Canadá, para determinar los factores más importantes de limitación del rendimiento, en el manejo de la producción de granos de maíz de secano. Se compuso un paquete de prácticas recomendadas (RP) con los niveles recomendados de N, P, K, micronutrientes, control químico de malezas y densidad de población de plantas (PPD). Cada factor se modificó a partir del RP, haciendo un total de 11 tratamientos. Bajo la baja incidencia de enfermedades o insectos, la infestación de malezas fue el factor limitante de rendimiento más importante, que redujo el rendimiento de grano en un 27-38%. Los resultados indicaron que la falta de control de malezas (uso de herbicidas) fue el principal factor limitante del rendimiento seguido por el fertilizante N y PPD. Las respuestas del rendimiento de grano a K, Zn y Mn fueron específicas del sitio y/o año. El estudio proporcionó datos experimentales y una comprensión de la brecha de rendimiento entre el potencial de rendimiento alcanzable del genotipo con las prácticas recomendadas, y los rendimientos con las prácticas de los productores.

El N fue el principal nutriente limitante en los sistemas de cultivo hasta que, en la década de 1950, el desarrollo del proceso Haber-Bosch comenzó la producción a gran escala de fertilizantes minerales que contienen N (Ma *et al.*, 2008; Robertson y Vitousek, 2009; Skowrońska y Filipek, 2014; Zhang *et al.*, 2013).

Sárvári y Pepó (2014) llevaron a cabo diferentes experimentos a largo plazo en suelos de chernozem y arcillosos en Hungría. Incluyeron los factores agro técnicos, biológicos (híbridos) y agroecológicos (año de cultivo, suelo) más importantes en la producción de maíz, evaluaron los resultados de experimentos poli factoriales a largo plazo, concluyeron que los diferentes niveles de insumos de los sistemas de manejo de cultivos de maíz pueden modificar la capacidad de adaptación a las condiciones ecológicas y la

resistencia de los agro ecosistemas. La optimización de los elementos agro técnicos reduce los efectos climáticos nocivos.

Ruffo *et al.*, (2015) en 2009 y 2010 determinaron factores de manejo y su contribución individual y acumulativa para reducir la brecha de rendimiento del maíz y los componentes de rendimiento en la rotación maíz-soya. Evaluaron cinco factores de manejo (población de plantas, resistencia transgénica a insectos, fungicida con estrobilurina, fertilización con P - azufre (S) - zinc (Zn) y fertilización con N. El control con tecnología alta (TA) produjo 2.9 Mg ha^{-1} ($2.12\text{-}3.50 \text{ Mg ha}^{-1}$ en sitios y años) más de grano (28%) que el control con tecnología estándar (TE), lo que demuestra la brecha de rendimiento entre la práctica tradicional de la parcela y el rendimiento alcanzable utilizando las tecnologías disponibles. Todos los factores de manejo, excepto la población de plantas, fueron necesarios para reducir la brecha de rendimiento. Los rasgos del gen fungicida y *Bacillus thuringiensis* (Bt) proporcionaron los mayores aumentos del rendimiento en comparación con el sistema de TE. Promediado en sitios y años, si cada factor fue retenido del sistema TA, el rendimiento disminuyó al disminuir el número de granos. El número de granos fue más significativo que el peso del grano para aumentar el rendimiento. La contribución al rendimiento de cada factor fue mayor cuando se aplicó como parte de un complemento de insumos suplementarios completo que cuando se agregó individualmente al sistema de TE.

Long *et al.*, (2017) realizaron un análisis a partir de los datos anuales ganadores del concurso de maíz del agricultor ($n=16,171$; período 2011-2016); proporcionados por la National Corn Growers Association y un conjunto de datos de literatura científica recopilados de publicaciones de investigación desde las últimas tres décadas. Los principales hallazgos fueron: (i) una correlación significativa entre la fecha de siembra y la latitud, (ii) el rendimiento de maíz se maximizó cuando la ventana de siembra fue entre los 89-106 días del año juliano (DOY) para las latitudes 30-35 N, 107-118 DOY para 35-40 N, <119 DOY para 40-45 N, y <129 DOY para 45-50 N, y (iii) ambos conjuntos de datos del concurso y de la literatura, describieron que la fecha de siembra se convierte

en un factor más relevante cuando se siembra tarde, se presentó una ventana de siembra relativamente más pequeña en latitudes altas en comparación con las bajas.

Kovács y Vyn (2017) llevaron a cabo un estudio para determinar la relación entre la concentración de nutrientes en la hoja de la mazorca durante la floración femenina, y el rendimiento de biomasa y grano de maíz en madurez, y encontraron que, la variación en las concentraciones de N, P, S y cobre (Cu) en las hojas de la mazorca explicó >50%, mientras que el hierro (Fe) explicó >40% de la variación tanto en rendimiento de grano como en materia seca. Estos nutrientes (N, P, S, Cu y Fe) también se correlacionaron positivamente entre sí (rango de Pearson=0.46-0.89). Sin embargo, las relaciones de las concentraciones de nutrientes de la hoja de la mazorca en etapa de floración femenina explicaron consistentemente menos de la variación del rendimiento de grano que las concentraciones de nutrientes de manera individual. Concluyeron que, las relaciones generales de las concentraciones de nutrientes de la hoja de la mazorca con rendimiento de grano sugirieron que las revisiones en las recomendaciones estatales para la "suficiencia de nutrientes" de la hoja de la mazorca pueden estar justificadas para algunos nutrientes.

Liu *et al.*, (2017) utilizaron las zonas agroclimáticas (CZ) y las estaciones meteorológicas de referencia (RWS), junto con el modelo Hybrid-Maize para estimar el potencial de rendimiento del maíz (Y_p) en las cuatro regiones de cultivo de maíz de China en condiciones de riego y de secano. En las áreas de maíz irrigado, obtuvieron 70 zonas de amortiguamiento RWS, y el área total de maíz en las zonas de amortiguamiento RWS cubrió el 67% del área total de maíz irrigado. En las áreas de maíz de secano, obtuvieron 106 zonas de amortiguamiento de RWS, que cubrieron el 51% del área total de maíz de secano. Como resultado de un análisis más detallado de cuatro regiones de cultivo de maíz, se encontró que la precipitación fue el factor limitante para que el potencial de rendimiento promedio limitado por agua (Y_w) alcanzara el nivel de Y_p excepto en el suroeste de China (SW), la precipitación promedio fue de más de 653 mm durante la temporada de cultivo de maíz.

Assefa *et al.*, (2017) estudiaron las tendencias del rendimiento de maíz en el periodo de 1987-2015, encontraron: (i) un aumento comparable en el rendimiento promedio de maíz en las latitudes (tasas de 108, 97 y 117 kg ha⁻¹ año⁻¹ para los grupos de latitud 35 a 40°, 40 a 45°, y 45 a 50° N, respectivamente), (ii) cuando los cambios de rendimiento se evaluaron según el entorno, se registró una mejora en los entornos de alto (AR) y de muy alto rendimiento (MAR) a la tasa máxima promedio de 50 kg ha⁻¹ año⁻¹, (iii) la proporción de ambientes AR y MAR aumentó en un 50% en los años 2007-2015 en comparación con 1987-1996, (iv) el rendimiento para ambientes de rendimiento medio (MR) y rendimiento bajo (BR) no cambió significativamente con el tiempo, y (v) la proporción de entornos BR y MR ha disminuido con el tiempo. Los aumentos en el límite máximo de rendimiento y la proporción de entornos AR fueron las razones principales para la mejora del rendimiento.

Van Loon *et al.*, (2019) evaluaron el impacto del manejo de cultivos, el suelo y los factores domésticos en los rendimientos del maíz en dos regiones productoras de maíz en Ghana mediante un enfoque integrado. Realizaron encuestas a familias campesinas, mediciones del rendimiento y muestreos del suelo en 2015 y 2016. El rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) fue estimado con un modelo de simulación del crecimiento, y dos experimentos en campo fueron llevados a cabo en 2016 y 2017. Las brechas de rendimiento estuvieron entre 3.8 Mg ha⁻¹ (67% Y_w) y 13.6 Mg ha⁻¹ (84% Y_w). No hubo consistencia en los factores que afectan el rendimiento de maíz y las brechas de rendimiento utilizando métodos complementarios. Los experimentos mostraron el potencial de las variedades mejoradas, fertilizantes y las densidades de población mejoradas, con rendimientos arriba de 9 Mg ha⁻¹. Esto no fue confirmado en el análisis de las encuestas a familias, la gran variación del rendimiento a través de los años en las mismas parcelas impidió la divulgación de los efectos del manejo, el suelo y los factores domésticos. Las bajas entradas naturales en el sistema a nivel de parcela y la incidencia del gusano soldado en otoño condujeron a rendimientos relativamente uniformes y bajos en toda la población.

Van Loon *et al.*, (2019) con lo mencionado anteriormente, indicaron que los rendimientos de los agricultores fueron determinados por la interacción y una fuerte variación entre: los factores domésticos, el suelo y el manejo. Además, encontraron que, con la alta variabilidad y la complejidad de los sistemas de pequeños productores, hay un riesgo en crear conclusiones tan simples basadas en resultados de aproximaciones metodológicas simples. Expresaron que la integración de encuestas a familias, la simulación del crecimiento del cultivo y los experimentos demostrativos pueden agregar valor al análisis de la brecha del rendimiento, sin embargo, el reto permanece para mejorar este tipo de evaluación, para desenredar satisfactoriamente la interacción de los factores que pueden ser manipulados por los agricultores para incrementar los rendimientos de los cultivos.

Munialo *et al.*, (2020) aplicaron un enfoque de análisis integrado que comprende el árbol de clasificación y regresión (CART), el modelo lineal generalizado mixto (GLMM) y el análisis factorial (FA) para explicar los factores relacionados con el suelo y el manejo que influyen en las brechas de rendimiento del maíz a fin de mejorar los rendimientos en un estudio realizado en Mukuyu y Shikomoli en el oeste de Kenia, sitios con alto y bajo potencial agroecológico respectivamente, referido a la fertilidad del suelo. Las brechas en el rendimiento del maíz se cuantificaron comparando los rendimientos en el percentil 90 de las granjas con los rendimientos determinados en 189 campos en 70 pequeñas propiedades muestreadas al azar. Los factores relacionados con el suelo y el manejo se determinaron en las etapas tempranas y tardías de desarrollo del maíz. El rendimiento de maíz en el percentil 90 de las parcelas en Mukuyu y Shikomoli fue de 5.1 y 4.8 t ha⁻¹, respectivamente, y la brecha de rendimiento promedio fue de 1.8 y 2.6 t ha⁻¹, lo que representa un rendimiento no alcanzado del 35% y 54% para Mukuyu y Shikomoli, respectivamente.

Munialo *et al.*, (2020), con respecto a la aplicación de los enfoques mencionados previamente, en el FA se reveló que el suelo es el principal factor que influye en las brechas de rendimiento de maíz en ambos sitios, en comparación con las variables relacionadas con el manejo. El método CART identificó la densidad del maíz, los valores de clorofila, la altura de la planta y la profundidad a la capa compacta como factores

consistentes que afectan el rendimiento en ambos sitios, mientras que GLMM identificó la textura del suelo (contenido de limo) como importante. Según el CART, la cobertura de malezas en las primeras etapas y la densidad del maíz en las últimas etapas fueron el factor más limitante en la producción de maíz en Mukuyu y Shikomoli, respectivamente. El análisis del GLLM identificó factores específicos agroecológicos que influyen en las brechas de rendimiento de maíz como P y Zn disponibles en el suelo, más la presión de las malezas en las primeras etapas de maíz en Mukuyu, y más la capacidad de intercambio de cationes del suelo y magnesio intercambiable en Shikomoli. Señalaron que, mediante un enfoque integrado fue posible identificar factores consistentes y específicos de la agroecología que limitan los rendimientos de los cultivos y que esto puede aumentar la aplicabilidad de los resultados a las pequeñas explotaciones agrícolas.

Huynh *et al.*, (2019) realizaron un experimento de campo durante 9 años bajo un suelo arenoso en el noreste de Alemania para analizar los efectos de la labranza (labranza cero, labranza convencional), régimen hídrico (secano, regadío) y rotación de cultivos (maíz continuo, rotación de cultivos de 4 años) y su desarrollo. El modelo lineal generalizado mostró que la labranza, el riego y la rotación de cultivos explicaron conjuntamente aproximadamente el 35% de la varianza total. El riego y la rotación de cultivos influyeron significativamente en el rendimiento de la biomasa de maíz, comenzaron a afectar en los primeros años en 2008 y 2011 respectivamente, mientras que la labranza comenzó a afectar significativamente el rendimiento a partir del cuarto año. En general, el riego tuvo la mayor importancia relativa como factor de manejo en comparación con la importancia de la labranza y la rotación de cultivos. La rotación de cultivos con leguminosas aumentó el contenido de N y carbono del suelo y condujo a un mayor rendimiento ($11.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) que el sistema de maíz continuo. Además, el efecto significativo de la rotación de cultivos en el rendimiento del siguiente cultivo (maíz) continuó después de 2 ciclos de una rotación de cultivos de 4 años. Una influencia significativa de las interacciones bidireccionales entre rotación, labranza y riego solo se encontró en años extremadamente secos.

4.2 Factores que influyen en la respuesta del rendimiento de grano en maíz

4.2.1 Agua

Mason *et al.*, (2008) documentaron la tasa de aumento del rendimiento de grano para híbridos de maíz de 1950 a 1999 en ambientes de secano y riego en el Este de Nebraska. La tasa más alta del aumento del rendimiento ($0.050 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se encontró para las condiciones de secano en suelos con alta capacidad de retención de agua, la segunda más alta fue para el cultivo bajo riego ($0.028 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Shisanya *et al.*, (2009) estudiaron los efectos de la precipitación y la dosis de N en el cultivo de maíz en Kenia, los resultados indicaron que la fertilidad del suelo aumentó ligeramente en todos los tratamientos (excepto el control) durante el período de estudio de 2 años. El rendimiento promedio de grano en los tratamientos fue de 1.1, 5.4, 3.5 y 4.0 Mg ha^{-1} durante la temporada larga de lluvias (TL) del 2000, la temporada corta de lluvias (TC) de 2000/2001, la TL del 2001 y la TC del 2001/2002, respectivamente. El rendimiento reducido en la TL del 2000 y la TL del 2001 se atribuyó a la mala distribución de las precipitaciones durante las dos estaciones.

Djaman *et al.*, (2013) estudiaron los efectos de las prácticas del riego completo y limitado sobre la altura de la planta de maíz, el índice de área foliar (LAI), el rendimiento de grano y la producción de biomasa, la evapotranspiración real del cultivo (ETa), las funciones de producción de rendimiento, los factores de respuesta al rendimiento (K_y), y el índice de cosecha (HI) en Nebraska, EUA. Evaluaron cuatro regímenes de riego (totalmente regado (FIT), 75% FIT, 60% FIT y 50% FIT) y un tratamiento de secano cada año. ETa, LAI, producción de biomasa, rendimiento de grano e HI se vieron significativamente afectados por los regímenes de riego. HI varió entre 0.49 para secano y 0.57 para FIT, con un promedio de tratamiento de 0.54. ETa varió de 481 mm para secano a 620 mm para FIT en 2009 y de 579 a 634 mm para los mismos tratamientos en 2010. Se midieron relaciones entre rendimiento y riego ($R^2 \geq 0.98$ en ambos años) y entre rendimiento y ETa ($R^2 = 0.94$ en 2009 y $R^2 = 0.97$ en 2010). Hubo un aumento lineal fuerte en la ETa con

cantidades crecientes de riego ($R^2 \geq 0.97$). Las relaciones rendimiento-riego y rendimiento-ETa mostraron variación entre los dos años debido al impacto de la variabilidad climática en estas relaciones, lo que indica la importancia de tener en cuenta el impacto de la variabilidad climática en las pendientes de las funciones de producción de rendimiento de los cultivos. Con base en las pendientes de las relaciones de ETa vs. rendimiento de grano, se produjeron 1.2 Mg ha⁻¹ (2009) y 1.7 Mg ha⁻¹ (2010) de grano por 25.4 mm de ETa más allá de 280 mm (2009) y 403 mm (2010) de la ETa que el maíz utilizó para comenzar a producir grano, que también se conoce como la cantidad de ETa requerida para establecer el rendimiento de grano. Los factores de respuesta del rendimiento variaron entre los tratamientos y con el año para el mismo tratamiento, y promediaron 1.65 en 2009 y 2.85 en 2010, con un promedio de los dos años de 1.82.

Limón-Ortega *et al.*, (2016) llevaron a cabo un estudio durante doce ciclos de cultivo para determinar la influencia del ambiente y la fertilización nitrogenada, en el cultivo de maíz de secano en México, al realizar un análisis de correlación entre la precipitación estacional y el rendimiento de grano, los autores encontraron que la precipitación estacional representó el 66% de la variación del rendimiento.

4.2.2 Suelo

Leeper *et al.*, (1974) midieron el efecto de la humedad almacenada en el suelo y disponible para la planta y encontraron que, con una fertilidad adecuada y un alto nivel de manejo, el potencial para producir maíz fue ampliamente determinado por la capacidad del suelo para almacenar y suministrar agua.

Sene *et al.*, (1985) al estudiar las relaciones entre la textura y estructura del suelo, y la respuesta en el rendimiento de grano al subsoleo, concluyeron que, las relaciones de correlación entre el aumento del rendimiento relativo y las propiedades físicas individuales del suelo fueron mayores para los horizontes perturbados A (Ap). Las propiedades físicas con valores de r altos fueron “contenido de arena muy gruesa más arena gruesa (2.0-0.5 mm) ($r=0.90$)”, “peso promedio del diámetro del agregado ($r=-$

0.72)” y “conductividad hidráulica saturada ($r=0.85$)”. El “índice de cono (impedancia mecánica)” no se correlacionó significativamente con los aumentos de rendimiento relativos, debido posiblemente a las diferencias de textura y estructura entre los suelos. Un modelo de regresión basado en arena muy gruesa más arena gruesa y arena fina representó el 93% de la variación en el aumento del rendimiento relativo entre los 12 sitios estudiados. Se utilizó un modelo económico con los modelos de regresión para determinar el método de labranza más rentable en cada sitio.

Franzluebbers (2018) a través de un estudio de la actividad biológica del suelo con el flujo del dióxido de carbono (CO_2), determinó la respuesta del rendimiento del maíz a la aplicación de N, y concluyó que el rendimiento de grano fue de $10.6 \pm 3.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ en 36 sitios. Hubo una asociación positiva entre el rendimiento relativo (es decir, el rendimiento sin la aplicación en banda sub superficial dividido por el rendimiento con la fertilización completa) y los niveles de N disponible para la planta (N inorgánico residual + mineralización neta de N durante 24 días) y el flujo de CO_2 después del rehumedecimiento del suelo seco durante 3 días. Concluyó que, cuando se determinó el flujo de CO_2 en primavera o antes de la siembra de maíz se consideró como un indicador ideal de la actividad biológica del suelo debido a sus características simples, rápidas y confiables relacionadas con la posible mineralización del N en el suelo y la respuesta del rendimiento del maíz al fertilizante N aplicado.

Alotaibi *et al.*, (2018) en un estudio para determinar la dosis óptima económica de fertilizante nitrogenado (DOEN), y el nitrato residual del suelo (NRS) influenciados por la textura del suelo en la producción de maíz, concluyeron que, el modelo cuadrático más meseta describió mejor la respuesta de rendimiento de grano de maíz y se utilizó para predecir la DOEN. El estudio demostró claramente que la textura del suelo debe ser un criterio importante sobre el cual se hacen recomendaciones de dosis estática de N para optimizar el rendimiento del grano de maíz y evitar la acumulación del NRS en el perfil del suelo, particularmente en las condiciones húmedas de Quebec, Canadá.

4.2.3 Fertilización

El N es parte de todas las células vivas. En las plantas el N es constituyente de la clorofila, todas las proteínas incluyendo las enzimas, y muchos otros componentes. De todos los nutrientes removidos del suelo por las plantas, solo los átomos de hidrógeno están presentes en más gran número que los átomos de N. Una ausencia de N causa que las hojas se tornen amarillas y atrofia el crecimiento. A la inversa, con un adecuado suministro de N, el crecimiento vegetativo es rápido y el follaje se torna en verde oscuro. La gran necesidad del N en las plantas y la limitada capacidad de los suelos de suministrar N disponible causa que este sea el nutriente más limitado para la producción de cultivos en una base global (Foth y Ellis, 1988). El N llega a la raíz por flujo de masas, proceso modificado por factores del suelo, clima, planta y manejo. La asimilación de N se realiza con gasto de energía metabólica por lo que ante un estrés energético (baja radiación, sequía, etc.) este proceso puede ser reducido significativamente. La acumulación de N en biomasa aérea bajo condiciones potenciales puede variar entre 240 y 320 kg ha⁻¹. Las tasas máximas de acumulación de N fluctuaron entre 2.7 y 3.7 kg ha⁻¹ día⁻¹ durante un periodo que se extendió entre los 25 y 100-120 días después de la emergencia, de acuerdo a los híbridos considerados. La removilización de N varía de acuerdo a la relación fuente/demanda durante el llenado de granos, con valores extremos de 100 kg ha⁻¹ de N (Uhart y Echeverría, 1997).

La incertidumbre acerca de cómo ajustar los niveles de fertilizante de N y los métodos de aplicación para las diferencias en las condiciones existen en casi todas partes. Incertidumbres similares existen a menudo para los otros nutrientes mayores y menores. El consumo de N necesario para una tasa de crecimiento máxima depende en parte de la tasa de crecimiento cuando este no está limitado por la falta de agua o nutrientes. El porcentaje de N en cultivos ampliamente diferentes parece estar determinado no tanto por la especie sino por el peso total de materia seca por unidad de área. El consumo aumenta bruscamente con el aumento de la materia seca cuando las plantas son pequeñas, pero apenas cuando son grandes. Así, paradójicamente, cuando los rendimientos son pequeños, la variación en ellos puede tener un gran efecto sobre el

requerimiento de fertilizante nitrogenado, pero cuando son grandes, la variación en ellos tendrá un efecto mucho menor. El aumento en la cantidad de N orgánico en las partes aéreas de la planta puede ser, por lo tanto, una fracción bastante constante de la disminución correspondiente de N inorgánico en el suelo (Greenwood, 1983).

Uhart y Echeverría (1997) determinaron eficiencias en el uso de N, comparándolas con datos de la literatura. Las fracciones recuperadas del conjunto de datos variaron entre 0.40 y 0.80, y las eficiencias fisiológicas entre 37 y 70 kg de grano por kg de N absorbido. Se estableció el balance entre oferta y demanda de N. Se aportaron estimaciones de la oferta de N de acuerdo a los suelos considerados. La demanda por el cultivo se estimó en 2 kg de N por 100 kg de grano producido. Se establecieron concentraciones críticas de N en hoja y tallo en 6 hojas desarrolladas y 15 días prefloración, así como concentraciones críticas de N en grano y en tallo a cosecha.

El maíz requiere alrededor de 20 a 25 kg de N ha⁻¹ por cada tonelada de grano producida. Por ejemplo, para producir 10 ton ha⁻¹ de grano el cultivo debería disponer de alrededor de 200 a 250 kg de N ha⁻¹ absorbidos por el cultivo. Esta cantidad sería la demanda de N para este nivel de rendimiento. La oferta del lote (N en el suelo + N del fertilizante) debería satisfacer esa necesidad para mantener el sistema en equilibrio nutricional. Esta aproximación es lo que se conoce como criterio o modelo de balance. Sin embargo, las diferencias entre las cantidades de N en el suelo y las absorbidas por el cultivo son determinadas por las llamadas eficiencias de absorción, que varían según se considere al N presente en el suelo a la siembra, al N mineralizado durante el cultivo y al N aportado como fertilizante (Melgar y Torres-Duggan, 2004).

Bugarín-Montoya *et al.*, (2002) indican que aún persisten problemas que son indispensables resolver, como es, precisar la dosis de fertilizantes que deben aplicarse para incrementar la eficiencia de aprovechamiento de los nutrimentos y fomentar la rentabilidad de la producción sin deterioro de los recursos naturales, señalan que una forma de proceder es, mediante la cuantificación de la demanda nutrimental diaria del

cultivo de interés, que permitiría hacer los ajustes necesarios en el manejo de la fertilización.

Ciampitti *et al.*, (2010) observaron que la aplicación balanceada de N, P y S, produjo un incremento en los rendimientos reflejado directamente en un aumento de la absorción de nutrientes (N, P y S) respecto a los tratamientos con aplicaciones desbalanceadas o sin aplicación de nutrientes. En todos los sitios, la máxima absorción de nutrientes se encontró directamente relacionada con un mayor rendimiento logrado.

Cuando la esencialidad de los elementos fue establecida se realizaron numerosas investigaciones sobre las consideraciones de los elementos en las plantas para asociarlas con su crecimiento o producción. Los problemas relacionados al contenido relativo de los nutrimentos en un cultivo están, de varias formas, conectados con problemas de fundamental importancia concerniente a técnicas de fertilización como, por ejemplo: la relación entre la cantidad aplicada del mismo nutrimento y el rendimiento de la cosecha. Con un conocimiento más amplio de estas relaciones, muchos problemas asociados con la nutrición de cultivos pueden ser resueltos (Alcántar-González *et al.*, 2016).

Guo *et al.*, (2016) al diseñar estrategias de manejo del cultivo de maíz en la Meseta Loess al noroeste de China para alcanzar un alto rendimiento y una alta eficiencia en el uso del N y concluyeron que, el diseño de un sistema integrado del manejo de cultivos y del N es una aproximación alternativa para maximizar el uso de la radiación solar y los periodos de temperatura favorable, para finalmente lograr un alto rendimiento y una nueva eficiencia en el uso del N.

Smyth y Cravo, (1990) realizaron un estudio sobre el manejo del P en la producción continua de maíz y chícharo (*Vigna unguiculata* L.), encontraron que el efecto residual de la aplicación de P al voleo, como medición de ambos rendimientos y el P del suelo (Mehlich-1), fue mayor a altas dosis.

El K representa al catión que es absorbido en mayor cantidad por las plantas, por lo que en la mayoría de los vegetales el contenido de este elemento sobrepasa considerablemente a los otros cationes alcalino y alcalinotérreos. Entre los diversos tipos de plantas las gramíneas, principalmente, son conocidas como acumuladoras de K. Este nutrimento es tomado por la raíz de las plantas como catión monovalente de la solución del suelo o directamente del complejo de adsorción de los coloides del suelo (Alcántar-González *et al.*, 2016).

Zare *et al.*, (2014) estudiaron el efecto del estrés por sequía, la pulverización de Fe y K sobre el rendimiento y sus componentes, durante 2010 y 2011 en el campo de investigación Abosaeid de Mahvellat, Irán, de acuerdo a sus resultados señalaron que el K podría reducir el impacto del estrés por sequía en maíz.

Amanullah *et al.*, (2016) realizaron experimentos de campo para estudiar la respuesta del maíz a la aplicación de K vía foliar y al suelo durante el verano de 2013 y 2014, en la Granja de Investigación Agronómica de la Universidad de Agricultura de Peshawar, Noroeste Pakistán, bajo condiciones de riego limitado. De los resultados concluyeron que la aplicación foliar de K a razón de 1-3% y de Zn a razón de 0.1-0.2% fue más beneficiosa en términos de mejor crecimiento, mayor rendimiento y componentes de rendimiento del maíz en condiciones limitadas de riego. La pulverización temprana (etapa vegetativa) dio como resultado un mejor crecimiento y un mayor rendimiento que la pulverización tardía (etapa reproductiva).

4.2.4 Densidad de población

Sangoi (2000) realizó una revisión de los factores que afectan a la población óptima de plantas de maíz, enfatizando los efectos de las altas densidades en el desarrollo de la mazorca y discutiendo cambios importantes en los rasgos de las plantas que han contribuido a aumentar la tolerancia de los híbridos modernos a las altas densidades de plantas. La población para el rendimiento económico máximo de grano de maíz varió de 30,000 a más de 90,000 plantas ha⁻¹, dependiendo de la disponibilidad de agua, la

fertilidad del suelo, la calificación de madurez, la fecha de siembra y el espacio entre hileras. Señala que cuando el número de individuos por área aumenta más allá de la densidad óptima hay una serie de consecuencias que son perjudiciales para la ontogenia de la mazorca, y resultan en esterilidad. La disponibilidad de híbridos precoces, con menor altura de planta, menor número de hojas, hojas verticales, estilos más pequeños y una mejor sincronía entre el tiempo de floración masculina y femenina ha mejorado la capacidad del maíz para enfrentar altas densidades sin mostrar esterilidad excesiva. Agregó que la resistencia mejorada a las altas densidades ha permitido que el maíz intercepte y use la radiación solar de manera más eficiente, contribuyendo al notable aumento en el potencial de rendimiento de grano. El aumento de la densidad de las plantas de maíz puede mejorar la biomasa y el rendimiento; sin embargo, también aumenta la competencia por los recursos ambientales entre plantas. Bajo una alta densidad de plantas, los cambios en la estructura y función de las plantas de maíz individuales y poblaciones enteras afectan la morfogénesis de las plantas, la acumulación de carbohidratos en el tallo, el tejido de la corteza del tallo, la resistencia mecánica del tallo, la estructura de la raíz y el funcionamiento de la raíz. Por lo tanto, las plantas de maíz se vuelven más susceptibles al acame a medida que aumenta la densidad (Jun *et al.*, 2017).

Haarhoff *et al.*, (2018) realizaron una revisión sistemática global de ensayos en secano para la densidad de población y rendimiento de grano en el cultivo de maíz. Señalaron que existe la necesidad de analizar más meta datos para proporcionar recomendaciones mejoradas para optimizar las poblaciones de plantas en diferentes condiciones climáticas y sistemas de producción de maíz de secano, y que en general, se ilustró la importancia de optimizar la población de plantas para las condiciones ambientales locales y los sistemas agrícolas.

Youngerman *et al.*, (2018) llevaron a cabo un estudio sobre el efecto de la densidad del cultivo de maíz en la biomasa de cultivos de cobertura intercalados, biomasa de las malezas y el rendimiento de grano de maíz. También compararon parcelas con y sin cultivos de cobertura intercalados a la misma densidad estándar de siembra de maíz. El

rendimiento del grano de maíz no difirió, pero la biomasa de malezas de la muestra tomada en octubre fue 31% menor en parcelas con cultivos de cobertura intercalados en comparación con parcelas sin cultivos de cobertura. De acuerdo a sus resultados sugirieron que, los agricultores orgánicos pueden: (i) mejorar la supresión de malezas en el maíz al intercalar cultivos de cobertura y (ii) optimizar el rendimiento del sistema de cultivo al sembrar maíz a una tasa ligeramente más baja (por ejemplo, 5-10%) de lo que típicamente se utiliza cuando se intercalan cultivos de cobertura. Recomendaron realizar una investigación adicional en una amplia gama de entornos para determinar las recomendaciones de tasa de siembra de maíz que optimicen el rendimiento del maíz, cubran el crecimiento del cultivo, la supresión de malezas y la rentabilidad en sistemas de cultivo orgánico.

4.2.5 Cultivar

Elings *et al.*, (1997) examinaron cuantitativamente las opciones para el mejoramiento del rendimiento de maíz en los trópicos, con un modelo de simulación de crecimiento de cultivos que se probó con datos de campo de cinco genotipos en cuatro entornos. Las simulaciones indicaron que, a altos niveles de producción, el llenado de grano de maíz está limitado por la demanda, y que el aumento del número de granos por m² a través de mazorcas primarias más grandes, prolificidad o mayores densidades de plantas, conducirá a mayores rendimientos de grano. Sobre una base teórica concluyeron que, las mazorcas primarias más grandes conducen a mayores rendimientos de grano en todas las tasas de crecimiento del cultivo, y que la mayor prolificidad conduce a mayores rendimientos de granos solo si la tasa de crecimiento del cultivo excede un umbral, bajo condiciones de crecimiento limitadas por N, la selección de genotipos que extraen más N de los suelos y tienen una senescencia de las hojas retrasada, prometen un aumento en los rendimientos, para el crecimiento del cultivo limitado por la disponibilidad de humedad alrededor de la floración, la selección continua para un conjunto mejorado de granos conduce a mayores rendimientos de grano.

El mejoramiento genético de cultivos básicos ha contado para más de la mitad de los pasados incrementos en rendimientos. Afortunadamente, una revolución en conocimientos de genética esta coevolucionando con el incremento en la demanda de comida, alimentos, fibras y combustibles. Utilizar diversidad genética ha sido un pilar de las mejorías de la producción anterior de secuenciación de ADN de alto rendimiento, las bioinformáticas relacionadas, y una cascada de tecnologías en genética pueden ahora ser empleadas para detectar previamente la variabilidad genética oculta, para entender las funciones de los genes, hacer más grande el uso de accesiones en bancos de germoplasma y hacer esquemas de mejoramiento más eficaces (Phillips, 2010).

4.3 Modelos para la simulación del rendimiento en maíz

Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas (García, 2008). Los modelos de simulación permiten integrar las variables climáticas, edáficas y genéticas al diagnóstico de la fertilización con N de los cultivos. La integración de todas estas variables constituye una ventaja importante sobre los otros criterios de diagnóstico ya que reduce el número y el efecto de “factores no controlados” y permite estimar probabilidades de riesgo para cada alternativa de manejo de N (García, 2005). Modelar la fenología es clave, ya que permite a los agricultores mejorar su conocimiento sobre el crecimiento de los cultivos y las etapas de desarrollo durante la temporada de crecimiento. Esta información es la base para mejorar la sincronización de las aplicaciones de pesticidas, así como la fertilización, el riego y los cronogramas para las operaciones de cosecha (Verdugo-Vásquez *et al.*, 2016).

Greenwood (1983) comenta que a menudo se ha obtenido un acuerdo bastante bueno entre la teoría y la medición, la importancia de los diferentes procesos varía mucho de una parte del mundo a otra, un proceso de importancia en una región puede tener poca importancia en otra. Galvis (1998) señala que la razón por la cual no es posible adoptar y aplicar directamente en México las técnicas analíticas de modelos que funcionen en la práctica en otros países para proponer una determinada recomendación de fertilizantes es que el N inorgánico extraído por cualquier método analítico es solo un índice de la disponibilidad de dicho nutrimento para los cultivos por lo que funciona únicamente para las condiciones edafoclimáticas y de manejo agronómico donde fue generado, señala que la opción es emplear modelos de simulación que son de gran utilidad para entender el efecto de las múltiples variables que modifican la dirección, intensidad y velocidad de los flujos de N en el sistema de producción; indica que al emplear modelos no solo se trata de satisfacer los criterios matemáticos y estadísticos para obtener un buen ajuste, sino que también se debe fundamentar el significado biológico de los parámetros de la ecuación, para así darle una interpretación agronómica coherente y para que adquiera un sentido práctico este análisis. Candelaria-Martínez *et al.*, (2011) al realizar un análisis de la aplicación de modelos de simulación en la agricultura concluyeron que, desde el enfoque del agro ecosistema, estos modelos se han usado para simular la sustentabilidad, bajo una visión holística y sistémica. Otra evolución importante ha sido considerar al productor como un sujeto que participa en la modelación y no como un componente más del sistema a modelarse, en el denominado modelaje participativo. Cleves *et al.*, (2016) realizaron una revisión de la aplicabilidad de los modelos de simulación y su importancia en la simulación agroclimática, y concluyeron que dichos modelos son herramientas técnicas fundamentales en la planificación de siembras y de cosechas.

Meng *et al.*, (2013) utilizaron simulaciones con el modelo Hybrid-Maize, los rendimientos más altos registrados publicados en la literatura, experimentos de campo y datos de encuestas agrícolas para evaluar los potenciales de rendimiento y las brechas del cultivo de maíz en cuatro regiones agroecológicas de China. El rendimiento alcanzable se recolectó a partir de experimentos de campo, que fueron realizados en las parcelas por

los agricultores, utilizando prácticas de manejo recomendadas por agrónomos locales. Para reducir la brecha entre el rendimiento simulado y el alcanzado por los productores, es esencial la comprensión y la cooperación multidisciplinarias entre las disciplinas de ciencias de las plantas, agronomía, ciencias del suelo, agroecología y extensión, que resultan en el manejo integrada del sistema suelo-cultivo.

Tao *et al.*, (2015) estimaron por condado, utilizando la simulación por conjuntos del modelo MCWLA-Maize, los potenciales de rendimiento de maíz de 1980 a 2008 en las principales regiones productoras de maíz de China. Presentaron y analizaron los patrones temporales y espaciales de los potenciales de rendimiento del maíz y las brechas de rendimiento durante 1980-2008. De acuerdo a sus resultados resaltaron la importancia de la intensificación sostenible de la agricultura para cerrar las brechas de rendimiento, así como el cultivo de nuevos materiales genéticos para aumentar el potencial de rendimiento y para satisfacer la creciente demanda de alimentos.

Cerrato *et al.*, (1990) al realizar una comparación de modelos para describir la respuesta en el rendimiento del maíz a la fertilización con N y concluyeron que, todos los modelos se ajustaron bien a los datos cuando se evaluaron mediante el uso del estadístico R^2 . Señalaron que los resultados mostraron claramente que, especialmente en medio de crecientes preocupaciones sobre los efectos económicos y ambientales de la sobre fertilización, el motivo por el cual se selecciona un modelo sobre otro merece más atención que en el pasado.

Liu *et al.*, (2012) calibraron y validaron el modelo APSIM-Maize para la fenología del maíz y los rendimientos, ya validado fue usado para estimar rendimientos potenciales, rendimientos potenciales en seco, y brechas de rendimiento para evaluar los impactos del clima en la productividad del maíz en el noreste de China (NEC). Durante la temporada de crecimiento del maíz de 1981 a 2010, los análisis indicaron una tendencia al calentamiento a través de todo el NEC, mientras que las tendencias en radiación solar y precipitación total tendieron a decrecer. Cuando el mismo híbrido fue especificado en APSIM para todos los años, un incremento simulado de la temperatura máxima resultó

en un impacto negativo en ambos, rendimiento potencial y rendimiento potencial en seco. Un incremento simulado en la temperatura mínima produjo cambios no significativos en el rendimiento potencial de seco. Sin embargo, el incremento de la temperatura mínima fue mostrado como resultado en un impacto positivo en el rendimiento a nivel de parcela, consistente con los resultados que los productores adoptaron híbridos de ciclo más largo por lo cual el incremento en la temperatura mínima proveyó mejores condiciones para la germinación, emergencia y el llenado de grano durante la noche. La brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial de seco mostró ser más grande en ubicaciones con la precipitación más baja (<500 mm) de la temporada. Sus resultados indicaron que las regiones con las más grandes brechas entre el potencial de seco y los rendimientos en campo fueron localizadas en el sureste del NEC. Dentro del NEC, los rendimientos de maíz en campo fueron, en promedio, solo 51% de los rendimientos potenciales, indicando una brecha de rendimiento grande explotable, lo cual provee una oportunidad para incrementar significativamente la producción con riego efectivo, fertilización, herbicida, y densidad de plantación en el NEC.

Meng *et al.*, (2013) en 50 simulaciones de sitios de alto rendimiento en China, de 1990 - 2009, encontraron que el potencial de rendimiento promedió 16.5 Mg ha⁻¹ para el maíz bajo riego y 13.9 Mg ha⁻¹ para el maíz de seco, respectivamente. Durante el mismo período, el rendimiento más alto registrado fue de 15.4 Mg ha⁻¹ o el 93% del potencial de rendimiento del maíz irrigado. En comparación, el rendimiento promedio de los agricultores fue de 7.9 Mg ha⁻¹ basado en 5,584 parcelas encuestadas en 2007-2008. En consecuencia, la brecha de rendimiento entre el rendimiento promedio del agricultor y el potencial de rendimiento modelado (YGM) fue de 8.6 Mg ha⁻¹ para maíz bajo riego y 6.0 Mg ha⁻¹ para maíz de seco, por lo que los agricultores alcanzaron el 48-56% del potencial de rendimiento. La brecha de rendimiento entre el rendimiento promedio del agricultor y el rendimiento más alto registrado (YGR) fue de 7.6 Mg ha⁻¹, por lo que los agricultores alcanzaron el 51% del rendimiento registrado. Debido a que los sitios utilizados para rendimientos simulados y registrados poseían las combinaciones más

favorables de manejo de suelos y cultivos, cerrar las brechas en YGM y YGR en los campos de los agricultores en un corto período de tiempo podría ser muy difícil.

Wang *et al.*, (2014) combinaron modelos de simulación y registros del rendimiento de maíz a largo plazo (1981-2009) de diez sitios para investigar los cambios en el potencial de rendimiento de maíz, el rendimiento real y las brechas de rendimiento en las últimas tres décadas en la llanura del norte de China (PNC). Los parámetros del cultivar en el modelo de APSIM-maize se obtuvieron con base a las fechas de floración y madurez registradas en cada sitio, y los resultados de la simulación del modelo calibrado pudieron explicar >63% de las variaciones en el rendimiento de grano de maíz registrado en los 10 sitios. Concluyeron que, si bien la aplicación de riego y fertilizantes nitrogenados ya se ha manejado a un nivel casi óptimo, se necesitarán otros nuevos avances tecnológicos para el avance futuro del rendimiento del maíz.

Liu *et al.*, (2017) en el estudio mencionado previamente, encontraron que el potencial de rendimiento del maíz (Y_p) promedio fue de 14.2 t ha^{-1} y los agricultores han alcanzado el 58% de Y_p . El potencial de rendimiento promedio limitado en agua (Y_w) fue de 10.7 t ha^{-1} y los agricultores han logrado el 65% de Y_w . Un análisis más detallado de cuatro regiones de cultivo de maíz mostró que la precipitación era un factor limitante para que Y_w alcanzara el nivel de Y_p excepto en el suroeste de China (SW), mientras que la precipitación promedio fue de más de 653 mm durante la temporada de cultivo de maíz. La proporción entre Y_w y Y_p (Y_w / Y_p) fue del 51% en el noroeste de China (NW) y alrededor del 80% tanto en el noreste de China (NE) como en la llanura del norte de China (NCP). La comparación de Y_p en diferentes regiones mostró que el bajo Y_p en NE se debió a la baja temperatura, mientras que el Y_p tanto en NCP como en SW se vio limitado por la baja radiación solar. Señalan que los hallazgos resaltan la eficiencia e importancia para estimar Y_p , Y_w y la brecha de rendimiento (Y_g) mediante el método de ampliación de escala con CZ y zonas de amortiguamiento RWS, la comparación de Y_p , Y_w y Y_g en diferentes regiones fue importante para mejorar la producción de maíz en el futuro en China.

Tagarakis y Ketterings (2017) al estimar el potencial de rendimiento de maíz con detección proximal encontraron que, la sequía en tres sitios en 2016 tuvo un impacto negativo en la precisión de las estimaciones de rendimiento de grano basadas en sensores ($R^2 < 0.27$). Excluyendo estos sitios, las predicciones de rendimiento más precisas se obtuvieron a partir de la etapa V6. En diferentes ubicaciones e independientemente del método de reporte, los datos de la estimación de rendimiento en temporada en V7 predijeron el rendimiento con un $R^2 > 0.70$ (grano) y $R^2 > 0.77$ (ensilaje). Concluyeron que los datos de la estimación de rendimiento en temporada obtenidos en V7 se pueden usar para predecir con precisión los rendimientos de grano de maíz y ensilaje en condiciones sin sequía en Nueva York.

Zhao *et al.*, (2018) colectaron los registros de los rendimientos de maíz y simularon tres niveles de rendimiento potencial (rendimiento potencial radiación-temperatura: Y_p , rendimiento potencial climático: Y_{pw} , y rendimiento potencial suelo-clima: Y_{pws}) con el Agricultural Production Systems Simulator (APSIM-Maize) de 1981-2010 en las tres principales regiones de cultivo en China (la región de maíz de primavera del norte de China (NCS), la región de maíz de verano en Huanghuaihai (HS) y la región de maíz de montaña en el suroeste de China (SCM)). Fueron analizadas las distribuciones de las cuatro categorías de rendimiento de maíz (incluyeron al rendimiento real: Y_a) y las zonas de estabilidad del rendimiento, y las limitaciones por precipitación, suelo, y tecnología, y manejo en el rendimiento promedio, estabilidad del rendimiento y producción total. Los rendimientos promedio registrados a nivel condado durante el periodo de estudio fueron $4,624.26 \text{ kg ha}^{-1}$; $4,718.32 \text{ kg ha}^{-1}$ y $3,880.44 \text{ kg ha}^{-1}$ en NCS, HS y SCM, respectivamente. Los coeficientes de variación (CV) para los rendimientos registrados fueron 0.40, 0.30 y 0.27 en NCS, HS, y SCM, respectivamente. Basado en el análisis de comprensión de ambos, rendimiento promedio y valores de CV, dividieron las principales áreas de producción de maíz en cuatro categorías de zona: aquellas rendimientos altos y estables (zona alto-estable), aquellas con rendimientos altos e inestables (zona alto-inestable), aquellos con rendimientos bajos y estables (zona bajo-estable) y aquellos con rendimientos bajos e inestables (zona bajo-inestable). La comparación de Y_p , Y_{pw} , Y_{pws} y Y_a a nivel condado, entre las tres regiones, reveló que la precipitación fue el factor más

limitante en ambos promedios de rendimiento (56%, 9,436.97 kg ha⁻¹ y 53%, 8,114.21 kg ha⁻¹) y CV (0.42 y 0.39) en todos los cuatro tipos de zona en las regiones NCS y HS, respectivamente. Por otro lado, la tecnología y el manejo fueron los factores limitantes más importantes en la región SCM (39%, 3,934.87 kg ha⁻¹). La producción total de maíz fue reducida en 47.6% y 52.7% por la precipitación en las regiones NCS y HS, respectivamente. Sin embargo, el efecto limitante del suelo fue más bajo que el de tecnología y manejo en la región NCS, mientras que fue el más alto para la región HS. En la región SCM, tecnología y manejo fue el factor limitante más importante (1,295.72 × 10⁴ t y 39.3%), seguido por la precipitación (613.80 × 10⁴ t y 18.6%) y el suelo (219.62 × 10⁴ t y 6.7%). En las tres regiones principales de cultivo, el efecto limitante de cada factor en la producción total en la zona alto-estable fue la más alta cantidad de todos los cuatro tipos de zona. Señalaron que los resultados pueden ser usados para proveer las bases teóricas para las políticas de adaptación objetivas del cambio climático para mejorar el rendimiento del maíz y su estabilidad en China, y pueden servir como una referencia para otras regiones de cultivo de maíz en el mundo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Selección de estudios

La búsqueda de información se realizó en los meses de junio y julio del año 2019 en Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo, en las bases de datos de revistas: Science Direct y ASCESS DL. Las palabras clave para la búsqueda de los estudios fueron: “high yield”, “corn” y “maize”, con las que se encontraron alrededor de 1,400 artículos publicados en todo el mundo, y abarcaron el periodo del año 1943 al 2017.

Los estudios encontrados fueron ordenados en carpetas por el(los) año(s) en qué se evaluaron los experimentos en campo.

Posteriormente se distinguieron a aquellos estudios en los cuales se reportaron resultados de producción de grano de los que reportaron datos sobre la obtención de maíz para forraje, etanol u otro subproducto, esto se realizó verificando el título y el resumen de cada artículo.

5.2 Extracción de datos

Una vez que ordenados los estudios, se seleccionaron alrededor de diez valores de rendimientos máximos de grano (R_G) representativos por año, en las ocasiones en las cuales los estudios abarcaron más de un año de investigación se pudieron encontrar datos para diferentes años, con lo cual pudieron representar más de un año de R_G . De los artículos seleccionados se capturaron todos los datos cuantitativos encontrados en las secciones “materiales y métodos” y “resultados”. Los datos se capturaron en un libro de Excel para poder ser manejados y analizados. Se procedió a analizar de manera visual, la dispersión de los valores de rendimiento de grano para localizar aquellos estudios que representaron valores atípicos.

Para el análisis de los R_G , se estandarizaron los valores a un contenido de humedad de 13% y fueron expresados en $Mg\ ha^{-1}$. Posteriormente, los datos que se extrajeron y capturaron en Excel, además del rendimiento de grano, fueron: localización, año(s) del estudio, material genético utilizado, manejo agronómico, propiedades y características del suelo; condiciones climáticas y la respuesta del cultivo a la experimentación. Debido a la diversidad de los ensayos consultados, no hubo homogeneidad en las variables que se reportaron, y se registraron como datos faltantes a todos aquellos no reportados en las investigaciones.

Para homogenizar y analizar los datos de los estudios encontrados, se realizó una clasificación de variables: 1) variables estudiadas; 2) otras variables reportadas; y 3) variables del sitio. El total de datos de R_G fue de 732, correspondientes a 104 estudios realizados y publicados alrededor del mundo.

5.3 Variable dependiente

La variable dependiente a estudiar fue el “rendimiento de grano” como uno de los productos finales del sistema de producción de maíz, y que depende de diversos factores, algunos de los cuales se reportaron en los estudios seleccionados. Esta variable dependiente se ve afectada por cada factor implicado en la producción de maíz.

5.4 Análisis estadístico

Una vez identificadas, capturadas y clasificadas las variables independientes de cada experimento a utilizar para la construcción del modelo, el análisis estadístico de los datos se efectuó de la siguiente manera:

Análisis general de los R_G : se realizó este análisis para determinar la tendencia de los R_G a través de los años (1943 - 2017) de estudio mediante una regresión lineal.

Análisis de los R_G por régimen hídrico: mediante regresiones lineales se analizó la tendencia de los R_G a través del tiempo (1959-2017) de los estudios en los cuáles se especificó el régimen hídrico.

Análisis general de los R_G por variable independiente identificada: se realizó el análisis de la tendencia de los R_G a través de los años, para cada variable independiente identificada indistintamente del régimen hídrico reportado mediante regresiones lineales.

Análisis general de los R_G por variable independiente identificada y régimen hídrico: para determinar la tendencia de los R_G a través de los años, para cada variable independiente identificada y de acuerdo al régimen hídrico reportado, mediante regresiones lineales.

Selección de las variables independientes identificadas para la generación del modelo: se seleccionaron las variables a utilizar para la creación del modelo de regresión para obtener el rendimiento de grano estimado R_{GE} y estas fueron: 1) lámina de riego, 2) dosis de N, 3) dosis de P, 4) dosis de K y 5) densidad de población.

Aplicación del método de regresión múltiple *stepwise* (regresión paso a paso): Para obtener el modelo que permita determinar el R_{GE} que comprenda el uso de las variables identificadas en los estudios.

La metodología de análisis de los factores fue realizada mediante un programa de cálculo "*stepwise*", que incluye o elimina variables predictoras según la incidencia que esto provoca en el estadístico empleado para valorar la significancia de la relación (De la Casa, 1992).

En este método, las variables más correlacionadas con la respuesta, se obtienen a través de una matriz de correlación simple. Se establecen luego los coeficientes parciales de correlación para las otras variables, seleccionando los de mayor valor. A través del valor parcial de "F", se examina la contribución que la primera variable hubiera hecho si la

segunda variable calculada hubiera entrado en la ecuación con el primero. Si resulta significativo este aporte, se retiene la primera que entró y con el procedimiento anterior, se calcula la siguiente variable a ser introducida, dado que las anteriores están en la ecuación. La nueva ecuación de regresión es determinada por los menores “F” significativos. Para determinar si las dos primeras variables introducidas deben permanecer en la ecuación, se debe aplicar una prueba parcial de “F” hasta agotar todas las variables. Su ventaja principal es que permite medir en cada etapa, la importancia relativa de todas las variables consideradas hasta el momento. De esta manera, se permite que una variable regresora que fue incluida en una etapa previa, salga del modelo posteriormente, porque su contribución es relativamente baja en relación con lo que aporta el conjunto de variables incluidas en etapas subsiguientes, solucionando así el problema de la alta correlación entre las variables regresoras (Chacín *et al.*, 2005).

Generación de las ecuaciones de regresión: a) general, b) por régimen hídrico y c) de acuerdo a la textura del suelo, sistema de labranza y sistema de riego.

Validación de los modelos: R_G observados vs R_G estimados mediante regresiones lineales.

Explicación agronómica de los modelos obtenidos: mediante la discusión con estudios relacionados a la estimación de cosecha de maíz, y los métodos utilizados.

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa R (R Core Team, 2017).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Distribución espacial y temporal de los datos

La revisión de los artículos proveyó datos de distintas partes del mundo en los que se alcanzó el máximo rendimiento de grano de maíz (R_G) en el periodo de 1943 - 2017, no se encontró registros del año 1947. Los estudios representaron un total de 80 distintas ubicaciones, de los cuales el 80% se localizaron en los Estados Unidos de América, por lo tanto, la mayor distribución espacial fue para el hemisferio norte. Con lo anterior, se alcanzó una representatividad de distintos entornos de producción y esquemas de manejo (Cuadro 1). A través de los años se incrementó la densidad de la población, el uso de fertilizantes y de variedades mejoradas en los sistemas de producción de maíz, con el fin de lograr los más altos rendimientos. Las investigaciones futuras podrían continuar centrándose en la mejora del rendimiento y la reducción de los entornos rendimiento bajo y rendimiento medio mediante tecnologías mejoradas del manejo de cultivo y el uso de híbridos (Assefa *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Resumen de los datos de rendimiento de grano (R_G) del periodo (1943-2017).

Rendimiento de grano (R_G)	General	Régimen hídrico	
		Riego	Secano
Observaciones	732	331	23
Mínimo ($Mg\ ha^{-1}$)	1.996	5.801	5.828
Primer cuartil ($Mg\ ha^{-1}$)	8.097	10.241	9.154
Mediana ($Mg\ ha^{-1}$)	10.796	11.701	10.790
Media ($Mg\ ha^{-1}$)	10.679	12.395	10.602
Tercer cuartil ($Mg\ ha^{-1}$)	12.640	15.414	12.668
Máximo ($Mg\ ha^{-1}$)	19.779	19.779	13.834

6.2 Tendencias del rendimiento de grano de maíz de 1943-2017

El R_G promedió $10.679\ Mg\ ha^{-1}$ (Figura 1), el valor máximo que se alcanzó fue de $19.779\ Mg\ ha^{-1}$ en el año 2012 y el mínimo $1.996\ Mg\ ha^{-1}$ y se registró en 1959; a través de los años de estudio, los datos mostraron una tendencia de tipo alcista ($P < 0.01$, $R^2 = 0.74$,

n=732), lo cual comprobó la mejora constante en los sistemas de producción para lograr un mayor R_G (Figura 2). Para el periodo de 1950 a 1999 en Nebraska, EUA, la tasa de aumento fue de $0.050 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en condiciones de secano en suelos con alta capacidad de retención de agua (Mason *et al.*, 2008). En el periodo de 1987-2015, Assefa *et al.*, (2017) encontraron un aumento comparable en el rendimiento promedio de maíz en las latitudes (tasas de $108, 97$ y $117 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para las latitudes 35 a 40° , 40 a 45° , y 45 a 50° N , respectivamente).

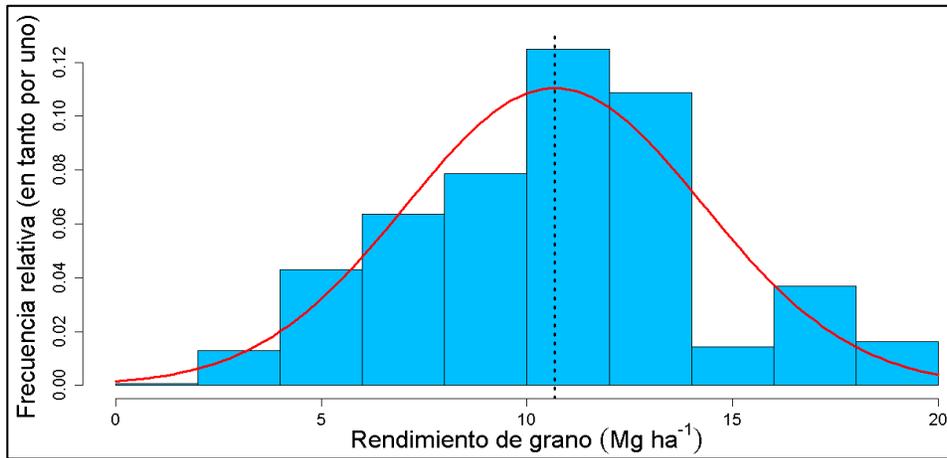


Figura 1. Histograma de los rendimientos de grano de maíz (R_G).

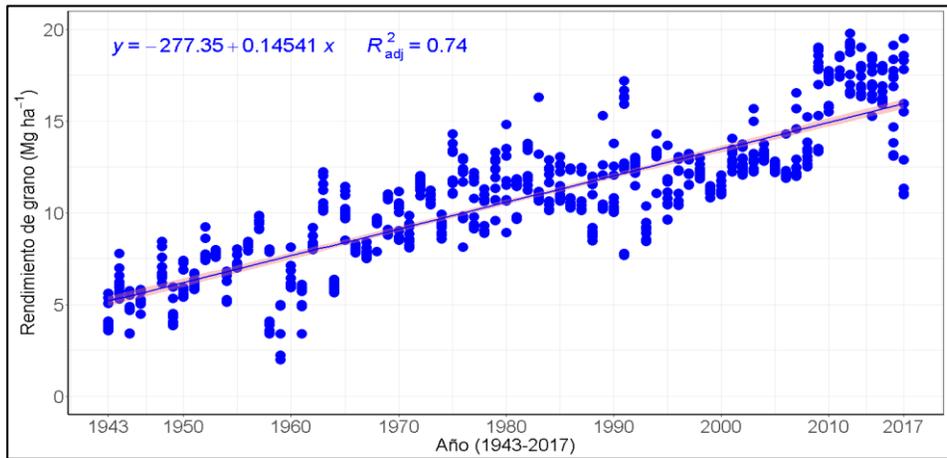


Figura 2. Relación entre los años de estudio y el R_G ($P < 0.01$).

6.2.1 Régimen hídrico

De acuerdo al régimen hídrico implementado en los estudios, el R_G promedió 12.395 $Mg\ ha^{-1}$ y 10.602 $Mg\ ha^{-1}$ para la producción bajo “riego” y “secano” respectivamente, mientras que el R_G máximo alcanzado para “riego” y “secano” fue de 19,779 $Mg\ ha^{-1}$ y 13,834 $Mg\ ha^{-1}$ respectivamente, en ambos casos de R_G y bajo ambos regímenes hídricos de “riego” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.70$, $n = 331$) y “secano” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.59$, $n = 23$), se observó una tendencia alcista a través de los años (Figura 3). Mason *et al.*, (2008) documentaron la tasa de aumento del rendimiento (0.050 $Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$) para las condiciones de secano en suelos con alta capacidad de retención de agua y de (0.028 $Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$) para el cultivo bajo riego. Djaman *et al.*, (2013) en el experimento mencionado previamente, en 2009 los rendimientos de maíz variaron de 9.05 $Mg\ ha^{-1}$ para el régimen de secano a 15.5 $Mg\ ha^{-1}$ para el riego completo, y en 2010 fueron de 11.7 $Mg\ ha^{-1}$ y 15.5 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente.

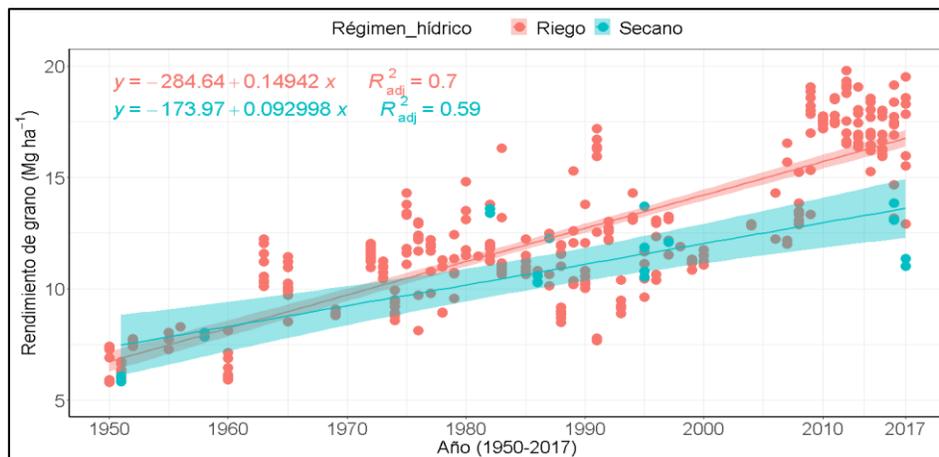


Figura 3. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos ($P < 0.01$).

6.3 Análisis a través del tiempo de las variables del estudio identificadas

Con análisis de la dispersión de los datos del efecto en el R_G para cada variable cuantitativa independiente, se delimitaron niveles para visualizar la tendencia a través del periodo de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de las variables cuantitativas estudiadas

Variable	Niveles					
L _R (mm)	<50	50-224	225-449	450-700	700-900	>900
N (Kg ha ⁻¹)	<100	100-199	200-299	300-399	400-499	>500
P (Kg ha ⁻¹)	<50	50-99	100-149	150-199	200-274	275-324
K (Kg ha ⁻¹)	50-94	95-144	145-200	201-249	250-300	>300
D _P (plantas m ⁻²)	<4.00	4.00-5.49	5.50-7.49	>7.50		

L_R: lámina de riego; N: dosis de N; P: dosis de P; K: dosis de K, D_P: densidad de población.

6.3.1 Variables estudiadas

6.3.1.1 Lámina de riego

La respuesta del R_G a la lámina de riego aplicada fue mayor para “mayor a 900 mm” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.74$, $n = 18$) y “450-700 mm” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$, $n = 26$) (Figura 4). Djaman *et al.*, (2013) con cuatro regímenes de riego: totalmente regado (FIT), 75% FIT, 60% FIT y 50% FIT, obtuvieron un aumento lineal fuerte en la ETa con las cantidades crecientes de riego ($R^2 \geq 0.97$), no encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) en el rendimiento de grano entre 75% y 100% FIT, en cuanto a la respuesta del cultivo al rendimiento del agua, 75% y 60% FIT fueron muy comparables con el tratamiento de FIT. Huynh *et al.*, (2019) encontraron que, bajo un suelo arenoso y condiciones secas, el riego aumenta significativamente los rendimientos y es el factor más importante en comparación con la labranza y la rotación de cultivos.

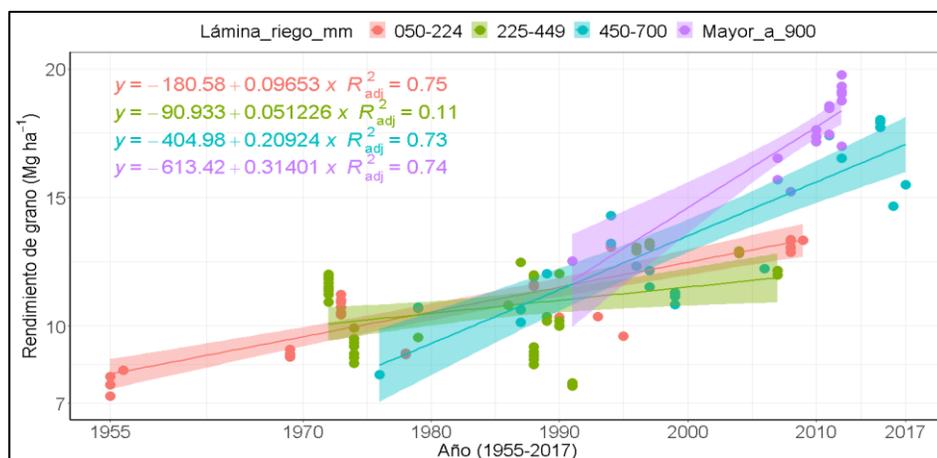


Figura 4. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes láminas de riego ($P < 0.01$).

6.3.1.2 Dosis de nitrógeno

En cuanto al manejo de la dosis de N, la respuesta del R_G fue mayor para “mayor a 500 kg N ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$, $n = 51$) y “400-499 kg N ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.90$, $n = 31$) (Figura 5). Subedi y Ma (2009) en el manejo de la producción de granos de maíz de secano, con la falta de aplicación de N antes del trasplante (100 kg ha⁻¹) redujo el rendimiento en un 10-22%, sin embargo, no hubo incremento en el rendimiento con N adicional (50 kg ha⁻¹). Ciampitti *et al.*, (2010) encontraron que el requerimiento de N para producir una tonelada de materia seca en el cultivo de maíz varió entre 14 a 18 kg. Guo *et al.*, (2016) encontraron que, el rendimiento de grano con su propuesta de manejo varió de 16.1-19.1 Mg ha⁻¹ durante cuatro años para la meseta Loess de China, y alcanzaron de 98 a 108% del rendimiento potencial (que oscila entre 15.5 a 19.3 Mg ha⁻¹), la dosis óptima de N varió de 207 a 222 kg ha⁻¹ con una alta proporción de 65 a 80 kg de grano de maíz por kg de N aplicado. Limón-Ortega *et al.*, (2016) en el estudio mencionado previamente, encontraron que cuando la aplicación de N aumentó de 0 a 60 kg ha⁻¹, el rendimiento aumentó 7.3%.

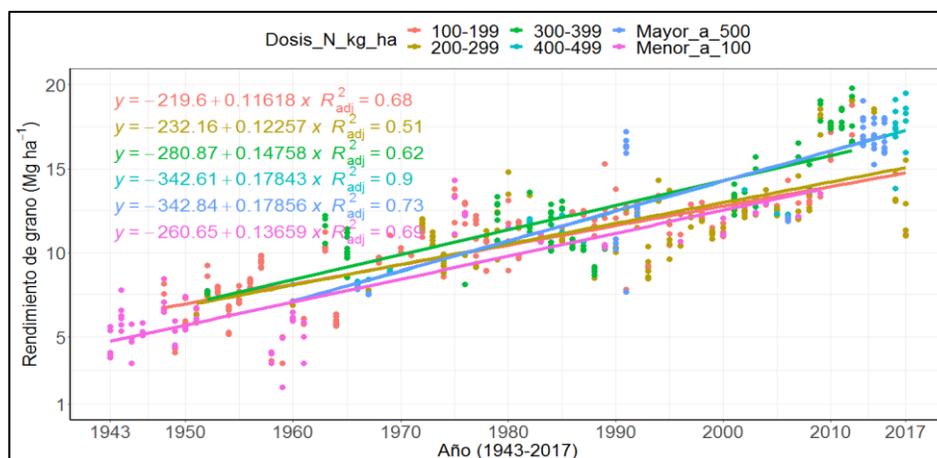


Figura 5. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de N ($P < 0.01$).

6.3.1.2.1 Régimen hídrico y dosis de nitrógeno

Con la combinación de las variables del régimen hídrico y la dosis de N: “riego” + “400-499 Kg N ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.92$, $n = 23$) y “riego” + “mayor a 500 Kg N ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.58$, $n = 42$)” se obtuvo una mayor respuesta en el R_G (Figura 6). Sifuentes-Ibarra *et al.*, (2015) evaluaron el mejoramiento de uso de N en maíz mediante técnicas de riego superficial y encontraron que el rendimiento de grano de maíz con un sistema de manguera Lay Flat® fue de 10,500 kg ha⁻¹, con una extracción de N por el grano de 165 kg ha⁻¹, y una extracción de N por la materia seca de 109 kg ha⁻¹. Anapalli *et al.*, (2018) comenzaron un experimento a largo plazo en 2008 en parcelas de 1.25 ha para evaluar los impactos de la labranza cero con sistema de retención de residuos completos (NT) sobre un sistema de labranza convencional (CT) en la producción de maíz bajo riego en un suelo franco limoso Dundee, en un clima húmedo; los datos recopilados de 2009-2015 se limitaron principalmente al rendimiento de grano; en 7 de 9 años (2009-2017), los rendimientos de grano cosechado bajo NT fueron significativamente más bajos que los cosechados bajo CT; las simulaciones mostraron que una aplicación adicional de 40 kg N ha⁻¹ en la siembra o una aplicación dividida de 50 kg ha⁻¹ en la siembra y los restantes 174 kg ha⁻¹ en la segunda semana de mayo podría hacer que el rendimiento de la NT sea comparable al de la CT.

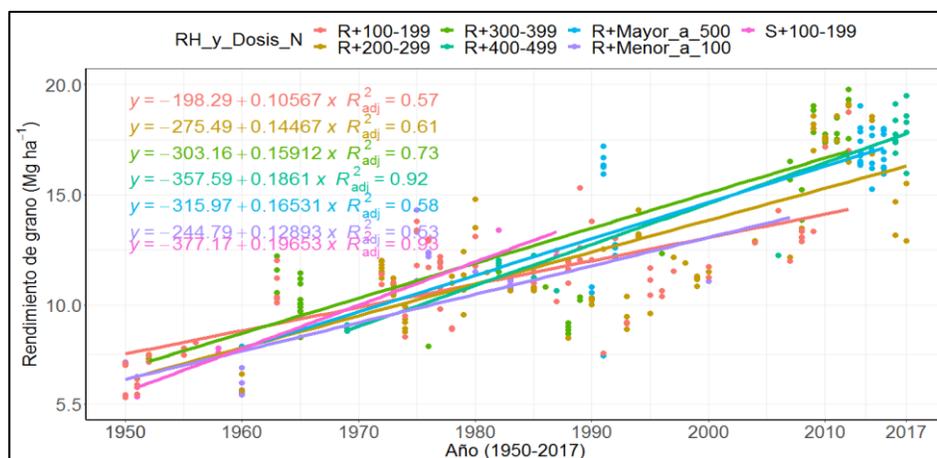


Figura 6. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de N ($P < 0.01$).

6.3.1.3 Dosis de fósforo

La mayor respuesta en el R_G a la dosis de P a través de los años fue para aquellas entre “275-324 Kg P ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.45$, $n = 23$) y “150-199 Kg P ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.84$, $n = 78$) (Figura 7). Smyth y Cravo, (1990) no observaron una respuesta en los rendimientos de maíz más allá de una dosis de 22 kg P ha⁻¹, en cantidades iguales de P aplicado, el P en banda proporcionó mayores rendimientos que aplicado al voleo durante el inicio de los cultivos, los rendimientos totales de maíz después de 11 ciclos, fueron similares para todas las combinaciones de aplicación en banda y al voleo en cantidades iguales de P total aplicado, la ausencia de una diferencia de rendimiento acumulativo entre los métodos de aplicación indicó que la colocación en banda de 22 kg P ha⁻¹, sería el mejor método de aplicación de P para mantener la producción del cultivo a largo plazo bajo las prácticas de labranza manual utilizadas en la región.

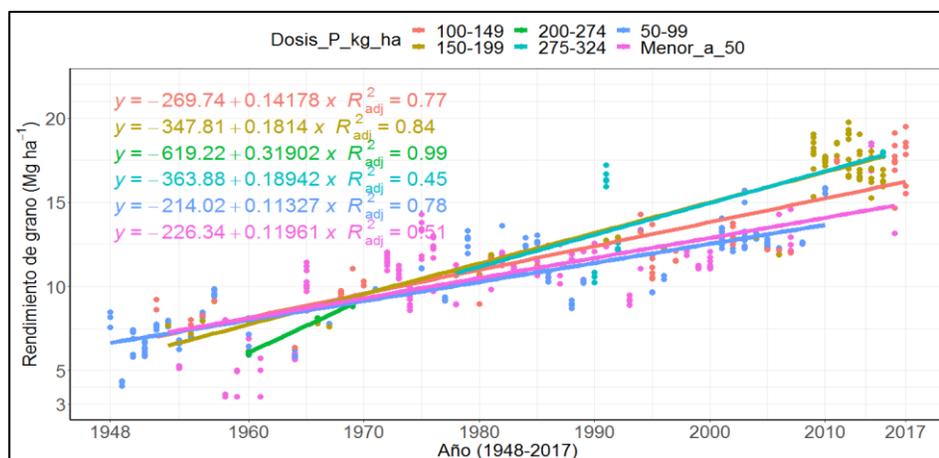


Figura 7. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de P (P<0.01).

6.3.1.3.1 Régimen hídrico y dosis de fósforo

Al combinar los efectos del régimen hídrico y la dosis de P, se observó mayor respuesta en el R_G para las combinaciones de “riego” + “150-199 Kg P ha⁻¹” (P<0.05, R²=0.062, n=59) y “riego” + “100-149 Kg P ha⁻¹” (P<0.01, R²=0.77, n=30) (Figura 8).

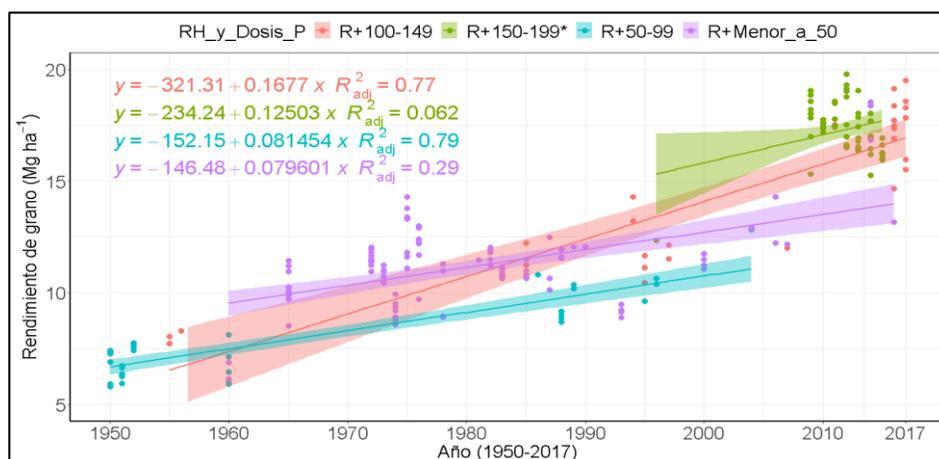


Figura 8. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de P (P<0.05).

6.3.1.4 Dosis de potasio

La respuesta en el R_G a la dosis de K fue mayor para “250-300 Kg K ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.92$, $n = 34$) y “145-200 Kg K ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.72$, $n = 57$) (Figura 9). Mam-Rasul (2010) estudió el efecto del cloruro de K (KCl) sobre el crecimiento y el rendimiento del maíz, durante la temporada de verano de 2005 en dos lugares diferentes de la gobernación de Sulaimani: Kanypanka y Bazyan, con dosis (0, 75, 150, 225, 300 kg K ha⁻¹), los resultados indicaron que el aumento de la aplicación de fertilizante KCl causó un aumento en el rendimiento de materia seca en 71.17% para Kanypanka y 51.45% para Bazyan, el rendimiento de grano aumentó 30.17% y 55.45% para Kanypanka y Bazyan, respectivamente, el rendimiento relativo fue de 91.72 a 85.44% para Kanypanka y de 97.00 a 65.83% para Bazyan, la respuesta del fertilizante K se incrementó de 8.27 a 41.56% en Kanypanka, mientras que en Bazyan fue de 3.00 a 34.25% y la eficiencia del uso de fertilizantes varió de 61.63 a 85.53% para Kanypanka y de 26.60 a 54.83% para Bazyan.

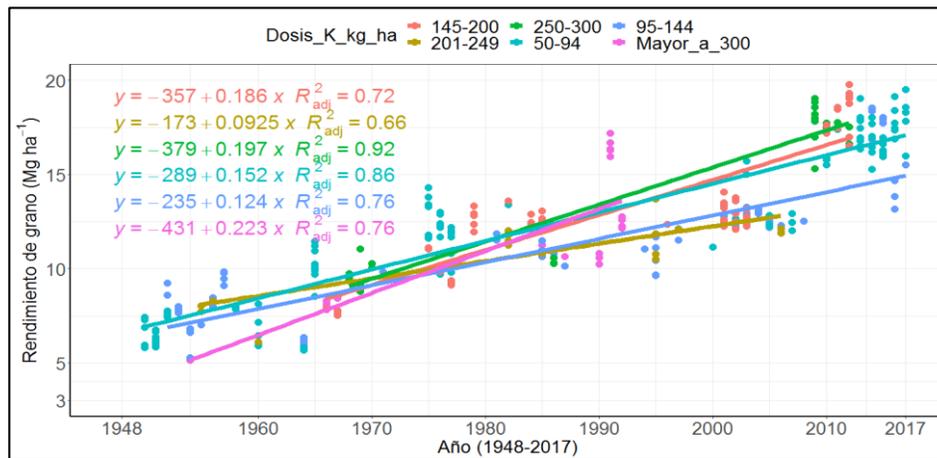


Figura 9. Relación entre los años de estudio y el R_G con diferentes dosis de K ($P < 0.01$).

6.3.1.4.1 Régimen hídrico y dosis de potasio

Con la combinación del régimen hídrico y la dosis de K, se observó una mayor respuesta en el R_G para “riego” + “145-200 Kg K ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$, $n = 19$) y “riego” + “250-300 Kg K ha⁻¹” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.94$, $n = 20$) (Figura 10). Subedi y Ma (2009) en la producción de

maíz de secano, el rendimiento se redujo hasta en un 13% en ausencia de K en un año. Zare *et al.*, (2014) estudiaron el efecto del estrés por sequía y encontraron que el uso de K en comparación con el tratamiento de control causa el aumento del rendimiento de grano, en el peso de 1,000 granos y en el número de granos en la mazorca 16.5, 9.0 y 5.5% respectivamente. Amanullah *et al.*, (2016) encontraron que las parcelas tratadas con K en el suelo tuvieron un mejor rendimiento que el control (sin aplicación de K) en términos de crecimiento mejorado, mayor rendimiento y mejoría en los componentes del rendimiento, sus resultados demostraron que, al aumentar la dosis de K aplicado hasta 90 kg de K ha⁻¹ en dos fracciones iguales (a la siembra y a la altura de la rodilla) mejora el crecimiento y la productividad del maíz en climas semiáridos.

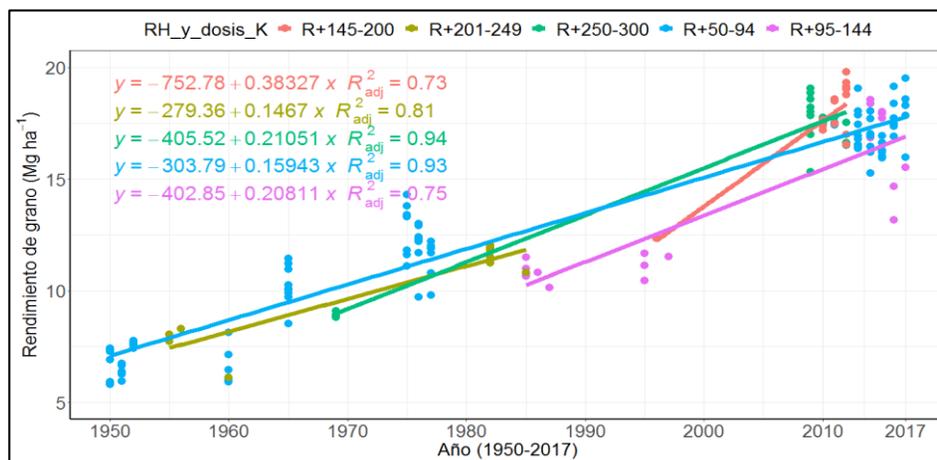


Figura 10. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y dosis de K (P<0.01).

6.3.1.5 Densidad de población

Respecto la densidad de población, la respuesta en el R_G fue mayor para la densidad “mayor a 7.5 plantas m⁻²” (P<0.01, R²=0.20, n=74) y “5.5-7.49 plantas m⁻²” (P<0.01, R²=0.29, n=126) (Figura 11). Ruffo *et al.*, (2015) consideran que en la rotación maíz-soya, el aumento de la población de plantas redujo la brecha (tecnología alta vs tecnología estándar) de rendimiento cuando todos los demás insumos se aplicaron a nivel suplementario. Youngerman *et al.*, (2018), determinaron que el aumento de la densidad del maíz tuvo un efecto negativo directo en la biomasa del cultivo de cobertura

intercalado, así como efectos indirectos que fueron mediados por la transmisión de luz y malezas; en dos sitios, el rendimiento de grano de maíz en la baja densidad de maíz (3.71 plantas m⁻²) no difirió del rendimiento de grano de maíz en la densidad estándar (7.41 plantas m⁻²).

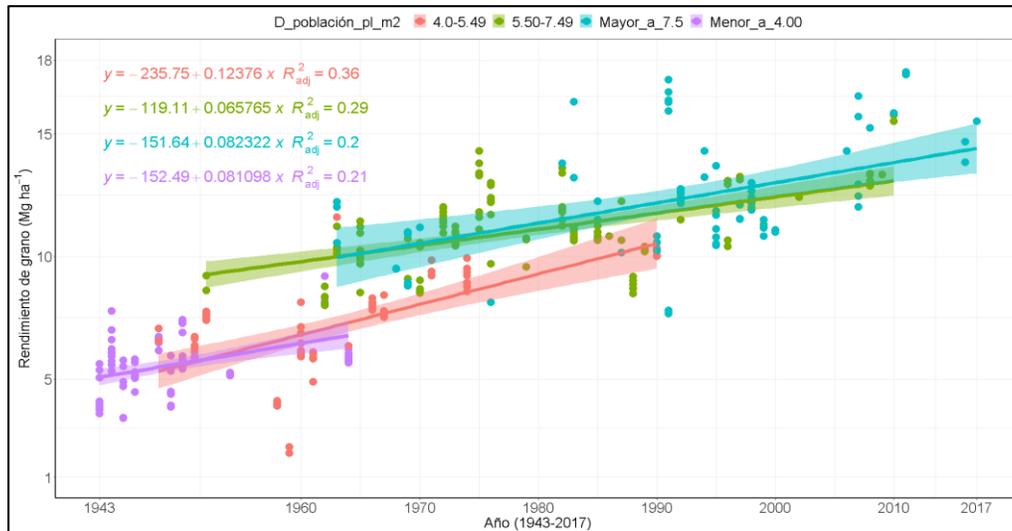


Figura 11. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes densidades de población (P<0.01).

6.3.1.5.1 Régimen hídrico y densidad de población

Al combinar el efecto del régimen hídrico y la densidad de población, se observó una mayor respuesta en el R_G para “riego” + “mayor a 7.5 plantas m⁻²” (P<0.01, R²=0.21, n=47)” y “riego” + “5.5-7.49 plantas m⁻²” (P<0.01, R²=0.11, n=101)” (Figura 12). Subedi y Ma (2009) en la producción de maíz de secano, el rendimiento de grano se redujo en un 8-13% con baja densidad de población de plantas (PPD) (60,000 plantas ha⁻¹) en todos los años, mientras que el aumento de PPD a 90,000 plantas ha⁻¹ no mejoró el rendimiento en comparación con un paquete de prácticas recomendadas. Haarhoff *et al.*, (2018) encontraron que, en ambientes áridos el rendimiento de grano de maíz en todas las poblaciones de plantas fue bajo (2,448 kg ha⁻¹) sin una respuesta clara; la variación en el rendimiento de grano de maíz fue alta en ambientes semiáridos donde la regresión polinómica (P<0.001, n = 951) tuvo un punto máximo en 140,000 plantas ha⁻¹, que reflejó

un rendimiento de grano de maíz de 9,000 kg ha⁻¹, en ambientes subhúmedos el rendimiento de grano de maíz tuvo una respuesta positiva a la población de plantas (P<0.001); el rendimiento del grano de maíz aumentó tanto para los sistemas labranza convencional (LC) como para labranza cero (LZ) a medida que aumentó la población de plantas; en los sistemas de producción de aporte alto de N (R²=0.19, P<0.001, n=2,018) la respuesta de la población de plantas al N aplicado fue más débil que en sistemas de aporte medio de N (R²=0.49, P<0.001, n=680).

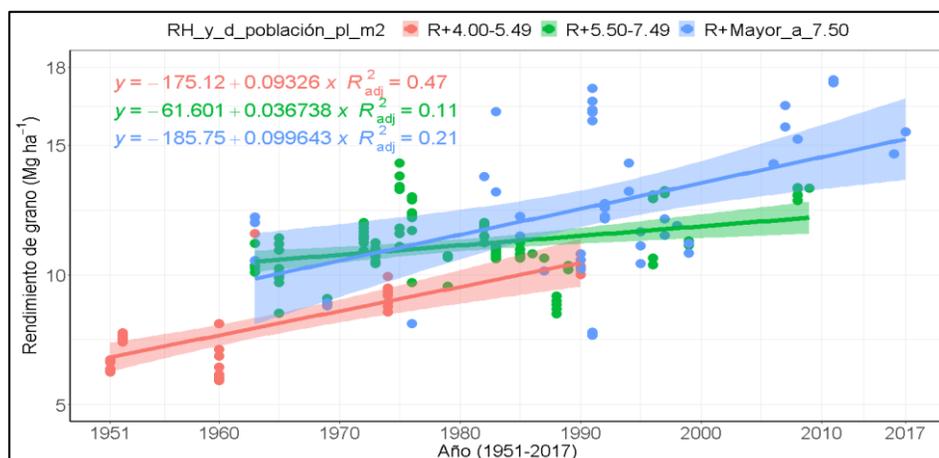


Figura 12. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y densidades de población (P<0.01).

6.3.1.6 Cultivar

Los materiales genéticos utilizados en los estudios fueron híbridos de empresas productoras de semillas y cruza probadas por centros de investigación, la generalidad de los datos señaló la predominancia de los maíces amarillos, sobre los de tipo dulce y blanco, sin embargo, no se analizó con especificidad qué materiales se usaron debido a que no se reportaron en la totalidad de los experimentos.

6.3.2 Otras variables reportadas

6.3.2.1 Sistema de labranza

En relación a los sistemas de labranza, hubo una respuesta significativa a través del tiempo y una tendencia de tipo alcista en el R_G obtenido en “labranza convencional” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.69$, $n = 397$) y “labranza cero” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.56$, $n = 14$) (Figura 14). Huynh *et al.*, (2019) determinaron que la influencia negativa de la labranza cero se hace notable después de 3 años, lo que lleva a un rendimiento significativamente menor en comparación con la labranza convencional.

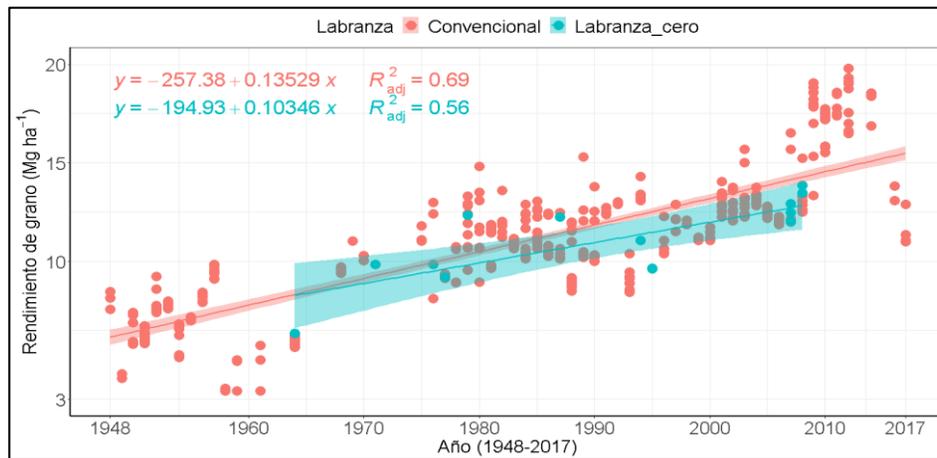


Figura 13. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de labranza ($P < 0.01$).

6.3.2.1.1 Régimen hídrico y sistema de labranza

En el R_G analizado de acuerdo al régimen hídrico y al sistema de labranza implementado, se observó una mayor respuesta para la combinación “riego” + “labranza convencional” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.70$, $n = 164$) y “secano” + “labranza convencional” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.87$, $n = 11$) (Figura 14). La pérdida de N por escorrentía y filtración profunda, la desnitrificación causada por un mayor contenido de agua del suelo y una baja tasa de mineralización de N causada por temperaturas más bajas del suelo bajo labranza cero contribuyeron

potencialmente a la disminución observada del rendimiento de grano bajo este sistema (Anapalli *et al.*, 2018).

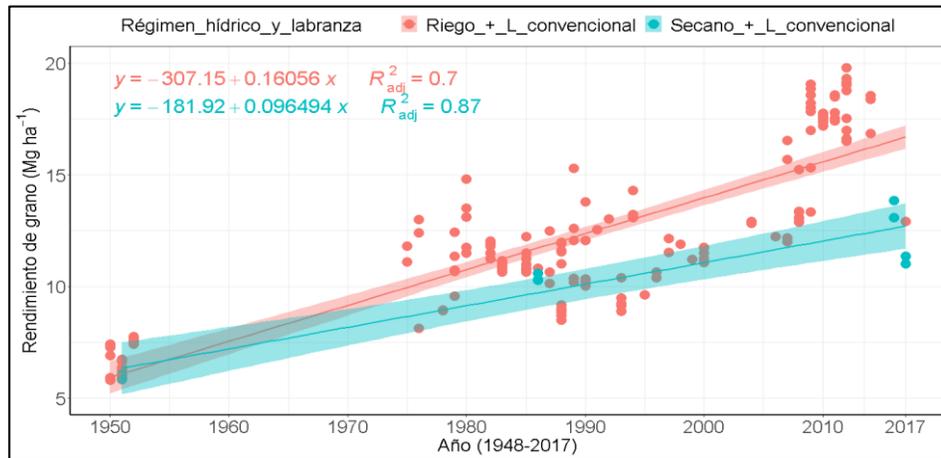


Figura 14. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y sistemas de labranza (P<0.01).

6.3.2.2 Sistema de riego

Otra variable reportada fue el sistema de riego, al analizar la tendencia del R_G en respuesta al sistema empleado se encontró que el “riego por goteo” (P<0.01, R²=0.74, n=57) registró el R_G superior a los demás sistemas a través de los años de estudio (Figura 15).

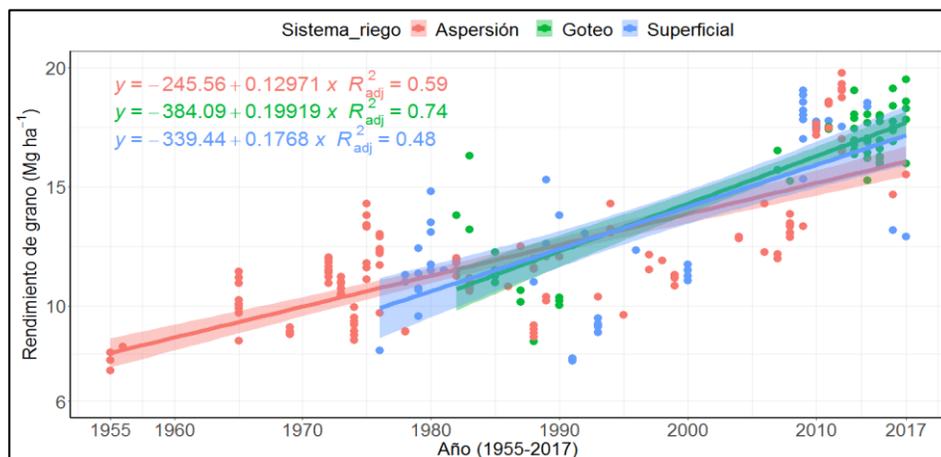


Figura 15. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de riego (P<0.01).

6.3.2.3 Sistema de cultivo

En relación al sistema de cultivo, se observó una respuesta positiva en el R_G para el “monocultivo” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.50$, $n = 92$) y “rotación” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$, $n = 157$) (Figura 16). Sárvári y Pepó (2014) para maíz, la rotación de cultivos más favorable fue con trigo de invierno, con adición de NPK de 60-120, 60-70 y 90-110 kg ha^{-1} respectivamente, y una densidad de 75,000-90,000 plantas ha^{-1} , en sistemas extensivos de manejo de cultivos los rendimientos de maíz variaron entre 2-11 t ha^{-1} y 10-15 t ha^{-1} para los intensivos. Huynh *et al.*, (2019) señalaron que la rotación de cultivos aumenta y mantiene significativamente el rendimiento del maíz tanto como lo hacen la labranza convencional y el riego.

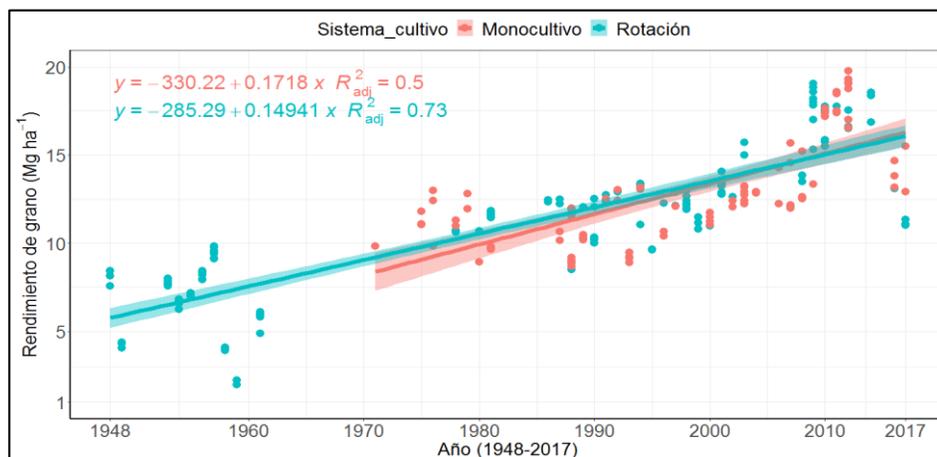


Figura 16. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de cultivo ($P < 0.01$).

6.3.2.3.1 Régimen hídrico y sistema de cultivo

Al combinar el régimen hídrico y el sistema de cultivo implementados y su efecto en el R_G , se observó una respuesta positiva para los sistemas de “riego” + “monocultivo” ($n = 68$) y “riego” + “rotación” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.81$, $n = 30$) (Figura 17).

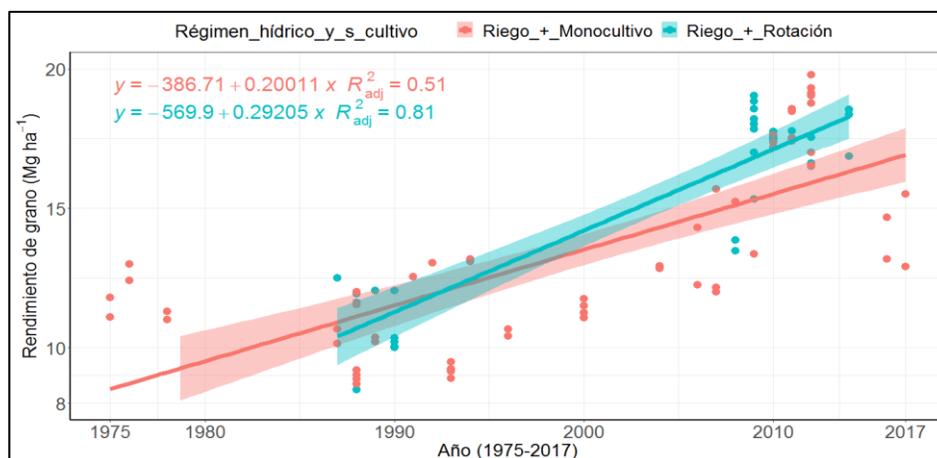


Figura 17. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes sistemas de cultivo ($P < 0.01$).

6.3.3 Variables del sitio

6.3.3.1 Suelo

De acuerdo a la textura de suelo reportada en los estudios realizados, el R_G más alto se alcanzó en aquellos con textura “franco arenosa” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.62$, $n = 73$) y “franca” ($P < 0.01$, $R^2 = 81$, $n = 61$) (Figura 18). Braimoh y Vlek (2006) investigaron las variables más importantes que afectan el rendimiento del maíz en el norte de Ghana; el efecto de la interacción entre la calidad del suelo y el barbecho sobre el rendimiento del maíz fue negativo, y sugirió la influencia de la calidad de la hojarasca y la inmovilización de N en los suelos. Alotaibi *et al.*, (2018) encontraron que la dosis óptima económica de fertilizante nitrogenado (DOEN) fue mayor en el suelo Gleysol (Sg) (173 kg ha^{-1}) y más baja en el suelo Podzol (Sp) (123 kg ha^{-1}) con un rendimiento de grano en Sp de casi un 60% menor que el previsto en otros grupos texturales del suelo, la DOEN en suelos arcillosos y francos fue de 144 y 164 kg ha^{-1} con un rendimiento de grano estimado de 12.7 y 12.0 Mg ha^{-1} , respectivamente, el contenido del nitrato residual del suelo (NRS) fue mayor en suelos Sg y Sp, y el NRS estimado en la DOEN en el suelo Sp fue inferior al observado, lo que indica posibles pérdidas de N en este suelo.

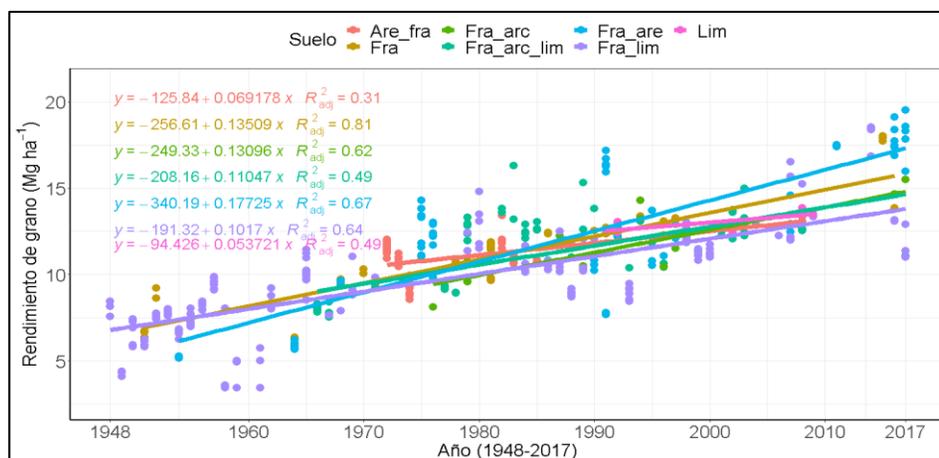


Figura 18. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes suelos ($P < 0.05$).

6.3.3.1.1 Régimen hídrico y suelo

Al analizar el R_G de acuerdo a la textura del suelo y el régimen hídrico, se observó que los valores mayores se encontraron en la combinación de “riego” + “suelo franco arenoso” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.69$, $n = 48$) y de “riego” + “suelo franco” ($P < 0.01$, $R^2 = 0.96$, $n = 13$) (Figura 19).

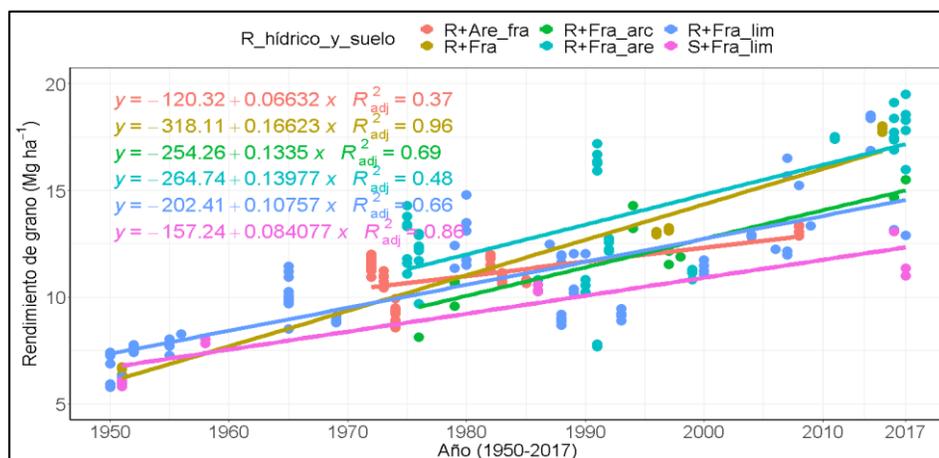


Figura 19. Relación entre los años de estudio y el R_G en diferentes regímenes hídricos y suelos ($P < 0.01$).

6.4 Modelos propuestos

Las variables seleccionadas y analizadas para la generación del modelo fueron: lámina de riego, dosis de N, dosis de P, dosis de K y densidad de población, con las cuales se generaron cuatro propuestas de modelos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Modelos propuestos para la predicción del rendimiento de maíz (R_{GE}).

No.	Modelo [¶]	n	EE	R ²
1	$R_{GE}=3.158205 + 0.693319 (D_P) - 0.022246 (K) + 0.005990 (L_R) + 0.010687 (N) + 0.013794 (P)$	45	0.964	0.73
2	$R_{GE}=8.4373743 + 0.0095280 (L_R) - 0.0166342 (K) + 0.0226333 (P)$	70	1.341	0.88
3	$R_{GE}=7.9784939 + 0.0085484 (L_R) + 0.0084006 (P)$	97	1.708	0.75
4	$R_{GE}=3.798942 + 1.082989 (D_P) - 0.002505 (K)$	187	1.742	0.63

R_{GE} : Rendimiento estimado de grano; n: número de observaciones; EE: error estándar; *P: valor de p; D_P : densidad de población (plantas m⁻²); K: dosis de K (Kg ha⁻¹); L_R : lámina de riego (mm); P: dosis de P (Kg ha⁻¹); N: dosis de N (Kg ha⁻¹); [¶] valor de $P < 0.01$.

De acuerdo al primer análisis al conjuntar las cinco variables identificadas de los estudios, el cual señaló a la densidad de población como la variable más significativa en el procedimiento *stepwise*, las combinaciones giraron en torno a esta variable, y se consideró como demandante de insumos (agua y fertilizantes); se eligió al modelo 1 para el reporte de resultados y su discusión debido a que consideró las cinco variables del estudio, y a que presentó el menor valor del error estándar.

6.4.1 Modelo:

El modelo se generó con la regresión lineal múltiple de todas las variables seleccionadas y que han sido objeto de estudio para alcanzar alto R_G a través del tiempo, las observaciones analizadas (n=45) con el método *stepwise* ordenaron las variables de acuerdo a su significancia, el método contempló a las cinco variables para generar el modelo.

$$R_{GE} = 3.158205 + 0.693319 (D_P) - 0.022246 (K) + 0.005990 (L_R) + 0.010687 (N) + 0.013794 (P)$$

Donde:

R_{GE} : rendimiento de grano estimado ($Mg\ ha^{-1}$);

K: dosis de K ($Kg\ ha^{-1}$);

D_P : densidad de población (plantas m^{-2});

L_R : lámina de riego (mm);

N: dosis de N ($Kg\ ha^{-1}$);

P: dosis de P ($Kg\ ha^{-1}$).

R_{GE} es función de las cinco variables identificadas y estudiadas en la presente investigación, los parámetros estadísticos del modelo ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$, $n = 45$) indicaron un error de $964\ Kg\ grano\ ha^{-1}$; en la figura 20 se relación los R_G y R_{GE} mediante una regresión lineal, cuya ecuación fue altamente significativa ($P < 0.01$, $R^2 = 0.73$), así mismo se observa la tendencia a la subestimación de los valores por parte del modelo generado.

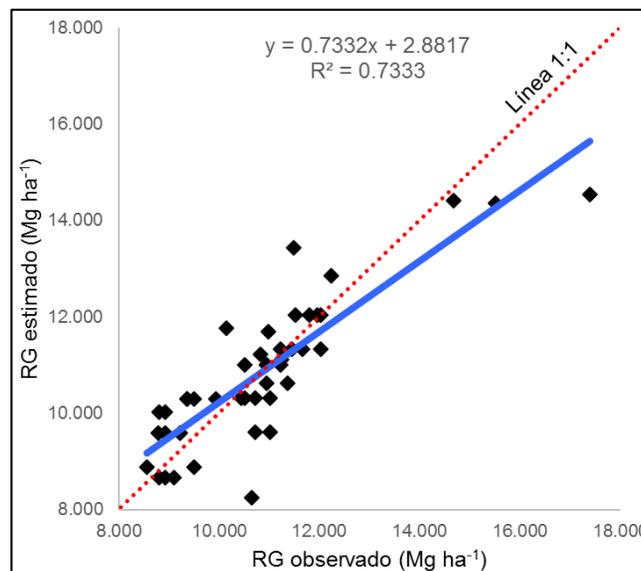


Figura 20. Relación entre los datos observados y los estimados con el modelo. La línea punteada indica la relación 1:1 entre el valor observado (R_G) y el estimado (R_{GE}).

Al respecto, De la Casa (1992) halló una ecuación de regresión múltiple ($R^2=0.80$, $EE=407.1 \text{ Kg ha}^{-1}$), basada en datos de precipitación, al utilizar el método stepwise para predecir el rendimiento de maíz en Argentina, constó de tres componentes, uno tecnológico o temporal, uno pluviométrico, y uno geográfico, dicha ecuación alcanzó un error porcentual medio entre 17 y 18% respecto de los datos testigos. Monteiro *et al.* (2017) estimaron mediante un modelo el rendimiento del maíz para de la temporada 2000/2001 a la 2007/2008 en Brasil basado en el nivel tecnológico de los sistemas de producción y las condiciones meteorológicas, hubo una alta correlación entre el rendimiento estimado y el observado ($0.76 > R^2 \geq 0.92$, $P < 0.01$) con la eficiencia del modelo entre 0.45 y 0.73, error medio relativo (MAE) entre -0.9 y 2.4, y error medio absoluto (MAE) inferior a 70 Kg ha^{-1} dependiendo del nivel tecnológico.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo planteado en la presente investigación y a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

Los factores que influyeron en la obtención del R_{GE} en maíz fueron: densidad de población, dosis de K, lámina de riego, dosis de N y dosis de P; y todos ellos pertenecieron al grupo de factores de tipo agronómico.

De acuerdo al análisis de estudios relacionados a la obtención del rendimiento de grano de maíz y a la diversidad de ambientes en donde se desarrollaron, la influencia de factores agronómicos se asoció de manera significativa con la respuesta del cultivo, por lo cual sólo se eligieron estas variables para estimar el R_{GE} .

El modelo de regresión ($n=45$, $R^2=0.73$, E. E.= 0.964 Mg ha^{-1}) representó el efecto de factores de tipo agronómico sobre el R_G , mientras que las variables ambientales no repercutieron de manera significativa sobre la respuesta del cultivo.

8. LITERATURA CITADA

- Alcántar-González, G.; Trejo-Téllez, L. I. y Gómez-Merino, F. C. 2016. Nutrición de cultivos. 2a. ed. Biblioteca Básica de Agricultura, México. 443 p.
- Alotaibi, K. D.; Cambouris, A. N.; Luce, M. S.; Ziadi, N. and Tremblay, N. 2018. Economic Optimum Nitrogen Fertilizer Rate and Residual Soil Nitrate as Influenced by Soil Texture in Corn Production. *Agron. J.* 110:2233-2242.
- Amanullah; Iqbal A.; Irfanullah. and Hidayat, Z. 2016. Potassium management for improving growth and grain yield of maize (*Zea mays* L.) under moisture stress condition. *Sci Rep.* 6:34627.
- Anapalli, S. S.; Reddy, K. N. and Jagadamma, S. 2018. Conservation Tillage Impacts and Adaptations in Irrigated Corn Production in a Humid Climate. *Agron. J.* 110(6):2673-2686.
- Assefa, Y.; Vara-Prasad, P. V.; Carter, P.; Hinds, M.; Bhalla, G.; Schon, R.; Jeschke, M.; Paszkiewicz, S. and Ciampitti, I. A. 2017. A New Insight into Corn Yield: Trends from 1987 through 2015. *Crop Sci.* 57:2799-2811.
- Berzsenyi, Z. and Dang, Q. L. 2008. Effect of various crop production factors on the yield and yield stability of maize in a long-term experiment. *Cereal Research Communications.* 36(1):167-176.
- Braimoh, A. K. and Vlek, P. L. G. 2006. Soil quality and other factors influencing maize yield in northern Ghana. *Soil Use and Management.* 22:165-171.
- Bugarín-Montoya, R.; Galvis-Spinola, A.; Sánchez-García, P. y García-Paredes, D. 2002. Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total del tomate. *Terra.* 20:401-409.
- Candelaria-Martínez, B.; Ruíz-Rosado, O.; Gallardo-López, F.; Pérez-Hernández, P.; Martínez-Becerra, A. y Vargas-Villamil, L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 14:999-1010.
- Cerrato, M. E. and Blackmer, A. M. 1990. Comparison of Models for Describing Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer. *Agron. J.* 82:138-143.
- Ciampitti, I. A., Boxler, M. y García, F. O. 2010. Nutrición de maíz: requerimientos y absorción de nutrientes. *Informaciones agronómicas del Cono Sur.* 48:14-18.

- Cleves L. J. A.; Toro, C. J. y Martínez, B. L. F. 2016. Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 10:149-163.
- De la Casa, A. 1992. Modelo estadístico de pronóstico de rendimiento de maíz para la región semiárida de Córdoba basado en datos pluviométricos areales. *Agriscientia*. 9(2):87-96.
- Djaman, K.; Irmak, S.; Rathje, W. R.; Martin, D. L. and Eisenhauer, D. E. 2013. Maize evapotranspiration, yield production functions, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 56(2):273-293.
- Elings, A.; White, J. W. and Edmeades, G. O. 1997. Options for breeding for greater maize yields in the tropics. *European Journal of Agronomy*. 25:155-168.
- Foth, H. D. and Ellis, B. G. 1988. *Soil fertility*. John Wiley & Sons. Inc. United States of America. 212 p.
- Franzluebbers, A. J. 2018. Soil-Test Biological Activity with the Flush of CO₂: III. Corn Yield Responses to Applied Nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82:708-721.
- Galvis, S. A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 327 p.
- García, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. IPNI. 19 p.
- García, J. M. 2008. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.
- Greenwood, D. J. 1983. Quantitative theory and the control of soil fertility. *New Phytol.* 94:1-18.
- Guo, J.; Wang, Y.; Fan, T.; Chen, X. and Cui, Z. 2016. Designing Corn Management Strategies for High Yield and High Nitrogen Use Efficiency. *Agron. J.* 108:922-929.
- Haarhoff, S. and Swanepoel, P. A. 2018. Plant Population and Maize Grain Yield: A Global Systematic Review of Rainfed Trials. *Crop Sci.* 58:1819-1829.
- Huynh, H. T.; Hufnagel, J.; Wurbsa, A. and Bellingrath-Kimura, S. D. 2019. Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany. *Field Crops Research*. 241(107565).

- Jun, X.; Rui-zhi, X.; Wang-feng, Z.; Ke-ru, W.; Peng, H.; Bo, M.; Ling, G. and Shao-kun, L. 2017. Research progress on reduced lodging of high-yield and -density maize. *Journal of Integrative Agriculture*. 16(12):60345-7.
- Karlen, D. L.; Sadler, E. J. and Camp, C. R. 1987. Dry Matter, Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Accumulation Rates by Corn on Norfolk Loamy Sand. *Agron. J.* 79:649-656.
- Kovács, P. and Vyn, T. J. 2017. Relationships between Ear-Leaf Nutrient Concentrations at Silking and Corn Biomass and Grain Yields at Maturity. *Agron. J.* 109:2898-2906.
- Leeper, R. A.; Runge, E. C. A. and Walker, D. M. 1974. Effect of Plant-Available Stored Soil Moisture on Corn Yields. I. Constant Climatic Conditions. *Agron. J.* 66:723-727.
- Limón-Ortega, A.; Ruiz-Torres, N. A.; Vazquez-Carrillo, G. and Baez-Perez, A. 2016. Environment and Nitrogen Influence on Rainfed Maize Yield and Quality. *Crop Sci.* 56:1257-1264.
- Liu, B.; Chen, X.; Meng, Q.; Yang, H. and Van Wart, J. 2017. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China-Distinguish irrigated and rainfed conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 239:108-117.
- Liu, Z.; Yang, X.; Hubbard, K. G. and Lin, X. 2012. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. *Global Change Biology*. 18:3441-3454.
- Long, N. V.; Assefa, Y.; Schwalbert, R. and Ciampitti, I. A. 2017. Maize Yield and Planting Date Relationship: A Synthesis-Analysis for US High-Yielding Contest-Winner and Field Research Data. *Front. Plant Sci.* 8:2106.
- Ma, W. Q.; Li, J. H.; Ma, L.; Wang, F. H.; Sisak, I.; Cushman, G. and Zhang, F. S. 2008. Nitrogen flow and use efficiency in production and utilization of wheat, rice, and maize in China. *Agric. Syst.* 99:53-63.
- Mam-Rasul, G. A. 2010. Effect of Potassium fertilizer on growth and yield of corn plants in some soils at Sulaimani governorate. *Mesopotamia J. of Agric.* 38(1):35-43.
- Mason, S. C.; Kent, D. K.; Eskridge, M. and Galusha, T. D. 2008. Yield Increase Has Been More Rapid for Maize than for Grain Sorghum. *Crop Sci.* 48:1560-1568.
- Melgar, R. y Torres-Duggan, M. 2004. Manejo de la fertilización en maíz. *IDIA XXI: Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario*. 4(6):114-121.

- Meng, Q.; Hou, P.; Wu, L.; Chen, X.; Cui, Z. and Zhang, F. 2013. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China. *Field Crops Research*. 143:91-97.
- Monteiro, J. E. B. de A.; Assad, E. D.; Sentelhas, P. C. and Azevedo, L. da C. 2017. Modeling of corn yield in Brazil as a function of meteorological conditions and technological level. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília. 52(3):137-148.
- Munialo, S.; Dahlin, A. S.; Onyango, M. C.; Oluoch-Kosura, W.; Marstorp, H. and Öborn, I. 2020. Soil and management-related factors contributing to maize yield gaps in western Kenya. *Food Energy Secur.* 9(1):1-17.
- Phillips, R. L. 2010. Mobilizing Science to Break Yield Barriers. *Crop Sci.* 50:S-99–S-108.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/> (accesado 01/Agosto/2019).
- Robertson, G. P. and Vitousek, P. M. 2009. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34:97-125.
- Ruffo, M. L.; Gentry, L. F.; Henninger, A. S.; Seebauer, J. R. and Below, F. E. 2015. Evaluating Management Factor Contributions to Reduce Corn Yield Gaps. *Agron. J.* 107:495-505.
- Sangoi, L. 2000. Understanding Plant Density Effects on Maize Growth and Development: An Important Issue to Maximize Grain Yield. *Ciência Rural.* 31(1):159-168.
- Sárvári, M. and Pepó, P. 2014. Effect of Production Factors on Maize Yield and Yield Stability. *Cereal Research Communications* 42(4):710-720.
- Sene, M.; Vepraskas, M. J.; Naderman, G. C. and Denton, H. P. 1985. Relationships of Soil Texture and Structure to Corn Yield Response to Subsoiling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:422-427.
- Shisanya, C. A.; Mucheru, M. W.; Mugendi, D. N. and Kung'u, J. B. 2009. Effect of organic and inorganic nutrient sources on soil mineral nitrogen and maize yields in central highlands of Kenya. *Soil & Tillage Research.* 103:239-246.
- Sifuentes-Ibarra, E.; Macías-Cervantes, J.; Ruelas-Islas, J. R.; Preciado-Rangel, P.; Ojeda-Bustamante, W.; Inzunza-Ibarra, M. A. y Samaniego-Gaxiola, J. A. 2015. Mejoramiento del grado de uso del nitrógeno en maíz mediante técnicas parcelarias de riego por superficie. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 6(8):1903-1914.

- Skowrońska, M. and Filipek, T. 2014. Life cycle assessment of fertilizers: a review. *Int. Agrophys.* 28:101-110.
- Smyth T. J. and Cravo, M. S. 1990. Phosphorus Management for Continuous Corn-Cowpea Production in a Brazilian Amazon Oxisol. *Agron. J.* 82:305-309.
- Subedi, K. D. and Ma, B. L. 2009. Assessment of some major yield-limiting factors on maize production in a humid temperate environment. *Field Crops Research.* 110:21-26.
- Tagarakis, A. C. and Ketterings, Q. M. 2017. *In-Season* Estimation of Corn Yield Potential Using Proximal Sensing. *Agron. J.* 109: 1323-1330.
- Tao, F.; Zhang, S.; Zhang, Z. and Rötter, R. P. 2015. Temporal and spatial changes of maize yield potentials and yield gaps in the past three decades in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 208:12-20.
- Uhart, S. A. y Echeverría, H. E. 1997. El rol del nitrógeno y del fósforo en la producción de maíz: Diagnóstico de la fertilización nitrogenada y fosforada. Ed. Semillas Híbridas Morgan. Buenos Aires, Argentina. 48 p.
- Van Loon, M. P.; Adjei-Nsiah, S.; Descheemaeker, K.; Akotsen-Mensah, C.; Van Dijk, M.; Morley, T.; Van Ittersum, M. K. and Reidsma, P. 2019. Can yield variability be explained? Integrated assessment of maize yield gaps across smallholders in Ghana. *Field Crops Research.* 236:132-144.
- Verdugo-Vásquez, N.; Acevedo-Opazo, C.; Valdés-Gómez, H.; Araya-Alman, M.; Ingram, B.; García de Cortázar-Atauri, I. and Tisseyre, B. 2016. Spatial variability of phenology in two irrigated grapevine cultivar growing under semi-arid conditions. *Precis. Agric.* 17:218-245.
- Voss, R. E.; Hanway, J. J. and Fuller, W. A. 1970. Influence of Soil, Management, and Climatic Factors on the Yield Response by Corn (*Zea mays* L.) to N, P, and K Fertilizer. *Agron. J.* 62:736-740.
- Wang, J.; Wang, E.; Yin, H.; Feng, L. and Zhang, J. 2014. Declining yield potential and shrinking yield gaps of maize in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology.* 195-196:89-101.
- Youngerman, C. Z.; DiTommaso, A.; Curran, W. S.; Mirsky, S. B. and Ryan, M. R. 2018. Corn Density Effect on Interseeded Cover Crops, Weeds, and Grain Yield. *Agron. J.* 110:2478-2487.
- Zare, K.; Vazin, F. and Hassanzadehdelouei, M. 2014. Effects of Potassium and Iron on yield of corn (*Zea mays* L.) in drought stress. *Cercetări Agronomice în Moldova.* 47(1):39-47.

Zhang, W. F.; Dou, Z. X.; He, P.; Ju, X. T.; Powlson, D.; Chadwick, D.; Norse, D.; Lu, Y. L.; Zhang, Y.; Wu, L.; Chen, X. P.; Cassman, K. G. and Zhang, F. S. 2013. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110:8375-8380.

Zhao, J.; Yang, X. and Sun, S. 2018. Constraints on maize yield and yield stability in the main cropping regions in China. *European Journal of Agronomy* 99:106-115.

ANEXO

Literatura consultada de los rendimientos de grano máximos obtenidos en las bases de datos del Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo.

- Acharya, U.; Chatterjee, A. and Daigh, A. L. M. 2019. Effect of Subsurface Drainage Spacing and Depth on Crop Yield. *Agron. J.* 111(4):1675-1681.
- Adams, W. E.; Morris, H. D.; Giddens, J.; Dawson, R. N. and Langdale, G. W. 1973. Tillage and Fertilization of Corn Grown on Lespedeza Sod. *Agron. J.* 65(4):653-655.
- Al-Kaisi, M. M. and Yin, X. 2003. Effects of Nitrogen Rate, Irrigation Rate, and Plant Population on Corn Yield and Water Use Efficiency. *Agron. J.* 95(6):1475-1482.
- Anapalli, S. S.; Reddy, K. N. and Jagadamma, S. 2018. Conservation Tillage Impacts and Adaptations in Irrigated Corn Production in a Humid Climate. *Agron. J.* 110(6):2673-2686.
- Barbazán, M. M.; Mallarino, A. P. and Sawyer, J. E. 2009. Liquid Swine Manure Phosphorus Utilization for Corn and Soybean Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:654-662.
- Barber, K. L.; Maddux, L. D.; Kissel, D. E.; Pierzynski, G. M. and Bock, B. R. 1992. Corn Responses to Ammonium-and Nitrate-Nitrogen Fertilization. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(4):1166-1171.
- Barber, S. A. 1958. Relation of Fertilizer Placement to Nutrient Uptake and Crop Yield I. Interaction of Row Phosphorus and the Soil Level of Phosphorus. *Agron. J.* 48:535-539.
- Bavec, F. and Bavec, M. 2002. Effects of plant population on leaf area index, cob characteristics and grain yield of early maturing maize cultivars (FAO 100-400). *European Journal of Agronomy.* 16:151-159.
- Beuve, M.; Naïbo, B.; Foulgocq, L. and Lapierre, H. 1999. Irrigated Hybrid Maize Crop Yield Losees Due to Barley Yellow Dwarf Virus-PAV Luteovirus. *Crop Sci.* 39:1830-1834.
- Biau, A.; Santiveri, F. and Lloveras, J. 2013. Stover Management and Nitrogen Fertilization Effects on Corn Production. *Agron. J.* 105:1264-1270.
- Binder, D. L.; Dobermann, A.; Sander, D. H. and Cassman, K. G. 2002. Biosolids as Nitrogen Source for Irrigated Maize and Rainfed Sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:531-543.

- Binder, D. L.; Sander, D. H. and Walters, D. T. 2000. Maize Response to Time of Nitrogen Application as Affected by Level of Nitrogen Deficiency. *Agron. J.* 92:1228-1236.
- Bordoli, J. M. and Mallarino, A. P. 1998. Deep and Shallow Banding of Phosphorus and Potassium as Alternatives to Broadcast Fertilization for No-Till Corn. *Agron. J.* 90:27-33.
- Breker, J. S.; DeSutter, T.; Rakkar, M. K.; Chatterjee, A.; Sharma, L. and Franzen, D. W. 2019. Potassium Requirements for Corn in North Dakota: Influence of Clay Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 83:429-436.
- Bundy, L. G.; Andraski, T. W.; Ruark, M. D. and Peterson, A. E. 2011. Long-Term Continuous Corn and Nitrogen Fertilizer Effects on Productivity and Soil Properties. *Agron. J.* 103(5):1346-1351.
- Cavero, J.; Medina, E. T. and Montoya, F. 2018. Sprinkler Irrigation Frequency Affects Maize Yield Depending on Irrigation Time. *Agron. J.* 110:1862-1873.
- Chacín, F.; Ascanio, M.; Hernández, A.; García, J.; Cobo, M. y Ascanio, A. 2005. Predicción de cosechas en plátanos (*Musa* AAB 'Hartón') mediante dos Modelos de Regresión (Forward y Stepwise). *Rev. Fac. Agron.* 31:21-35.
- Costa, C.; Dwyner, L. M.; Stewart, D. W. and Smith, D. L. 2002. Nitrogen Effects on Grain Yield and Yield Components of Leafy and Nonleafy Maize Genotypes. *Crop Sci.* 42:1556-1563.
- Couto, A.; Padín, A. R. and Reinoso, B. 2013. Comparative yield and water use efficiency of two maize hybrids differing in maturity under solid set sprinkler and two different lateral spacing drip irrigation systems in León, Spain. *Agricultural Water Management.* 124:77-84.
- Cox, W. J. and Cherney, J. H. 2012. Lack of Hybrid, Seeding, and Nitrogen Rate Interactions for Corn Growth and Yield. *Agron. J.* 104:945-952.
- Crookston, R. K.; Kurle, J. E.; Coperland, P. J.; Ford, J. H. and Lueschen, W. E. 1991. Rotational Cropping Sequence Affects Yield of Corn and Soybean. *Agron. J.* 83:108-113.
- Deckard, E. L.; Lambert, R. J. and Hageman, R. H. 1973. Nitrate Reductase Activity in Corn Leaves as Related to Yields of Grain and Grain Protein. *Crop Sci.* 13(3):343-350.

- Derby, N. E.; Steele, D. D.; Terpstra, J.; Knighton, R. E. and Casey, F. X. M. 2005. Interactions of Nitrogen, Weather, Soil, and Irrigation on Corn Yield. *Agron. J.* 97:1342-1351.
- Dodd, J. R.; and Mallarino, A. P. 2005. Soil-Test Phosphorus and Crop Grain Yield Responses to Long-Term Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1118-1128.
- Duncan, E. R. 1954. Influences of varying plant population, soil fertility and hybrid on corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 18:437-440.
- Ebelhar, S. A.; Kamprath, E. J. and Moll, R. H. 1987. Effects of Nitrogen and Potassium on Growth and Cation Composition of Corn Genotypes Differing in Average Ear Number. *Agron. J.* 79(5):875-881.
- Echarte, L.; Maggiora, A. D.; Cerrudo, D.; González, V. H.; Abbate, P.; Cerrudo, A.; Sadras, V. O. and Calviño, P. 2011. Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean. *Field Crops Research.* 121:423-429.
- Eck, H. V. 1984. Irrigated Corn Yield Response to Nitrogen and Water. *Agron. J.* 76(3):421-428.
- Farré, I. and Faci, J. M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management.* 96:383-394.
- Fernández, J. E.; Moreno, F.; Murillo, J. M.; Cayuela, J. A.; Fernández-Boy, E. and Cabrera, F. 1996. Water use and yield of maize with two levels of nitrogen fertilization in SW Spain. *Agricultural Water Management.* 29:215-233.
- Fitts, J. W.; Bartholomew, W. V. and Heidel, H. 1953. Correlation Between Nitrifiable Nitrogen and Yield Response of Corn to Nitrogen Fertilization on Iowa Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 17(2):119-122.
- Fleming, A. A.; Giddens, J. E. and Beaty, E. R. 1981. Corn Yields as Related to Legumes and Inorganic Nitrogen. *Crop. Sci.* 21(6):977-980.
- Foy, C. D. and Barber, S. A. 1958. Magnesium Deficiency and Corn Yield on Two Acid Indiana Soils. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 22(2):145-148.
- Fuehring, H. D. 1966. Nutrition of Corn (*Zea mays* L.) on a Calcareous Soil: III. Interaction of Zinc and Boron with Plant Population and the Relationship between Grain Yield and Leaf Composition. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 4:489-494.
- Gard, L. E.; McKibben, G. E. and Jones Jr, B. A. 1961. Moisture Loss and Corn Yields on a Silt-Pan as Affected by Three Levels of Water Supply. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25:154-157.

- Gaska, J. M. and Oplinger, E. S. 1988. Use of Ethephon as a Plant Growth Regulator in Corn Production. *Crop Sci.* 28(6):981-986.
- Graham, R. F.; Greer, K. D.; Villamil, M. B.; Nafziger, E. D. and Pittelkow, C. M. 2018. Enhanced-Efficiency Fertilizer Impacts on Yield-Scaled Nitrous Oxide Emissions in Maize. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82:1469-1481.
- Greub, C. E.; Roberts, T. L.; Slaton, N. A. and Kelley, J. P. 2017. Pre-Plant Nitrogen Fertilizer Uptake and Partitioning in Furrow-Irrigated Corn. *Agron. J.* 109:2974-2981.
- Greub, C. E.; Roberts, T. L.; Slaton, N. A.; Kelley, J. P. and Gbur, E. E. 2018. Evaluating Tissue Tests to Improve Nitrogen Management in Furrow-Irrigated Mid-South Corn Production. *Agron. J.* 110(4):1580-1588.
- Griffith, D. R.; Kladvko, E. J.; Mannering, J. V.; West, T. D. and Parsons, S. D. 1988. Long-Term Tillage and Rotation Effects on Corn Growth and Yield on High and Low Organic Matter, Poorly Drained Soils. *Agron. J.* 80(4):599-605.
- Griffith, D. R.; Mannering, J. V.; Galloway, H. M.; Parsons, S. D. and Richey, C. B. 1973. Effect of Eight Tillage-Planting Systems on Soil Temperature, Percent Stand, Plant Growth, and Yield of Corn on Five Indiana Soils. *Agron. J.* 65(2):321-326.
- Heckman, J. R. 1995. Corn Responses to Chloride in Maximum Yield Research. *Agron. J.* 87(3):415-419.
- Heckman, J. R. and Kamprath, E. J. 1992. Potassium Accumulation and Corn Yield Related to Potassium Fertilizer Rate and Placement. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(1):141-148.
- Hergert, G. W.; Klocke, N. L.; Petersen, J. L.; Nordquist, P. T.; Clark, R. T. and Wicks, G. A. 1993. Cropping Systems for Stretching Limited Irrigation Supplies. *J. Prod. Agric.* 6:520-529.
- Hills, F. J.; Broadbent, F. E. and O. A. Lorenz. 1983. Fertilizer Nitrogen Utilization by Corn, Tomato, and Sugarbeet. *Agron. J.* 75(3):423-426.
- Howell, T. A.; Schneider, A. D. and Dusek, D. A. 2002. Effects of Furrow Diking on Corn Response to Limited and Full Sprinkler Irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:222-227.
- Howell, T. A.; Tolk, J. A.; Shneider, A. D. and Evett, S. R. 1998. Evapotranspiration, Yield, and Water Use Efficiency of Corn Hybrids Differing in Maturity. *Agron. J.* 90:3-9.

- Hunter, A. S. and Yungen, J. A. 1955. The influence of variations in fertility levels upon the yield and protein content of field corn in eastern Oregon. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19:214-218.
- Isfan, D. 1979. Nitrogen Rate-Yield-Precipitation Relationships and N Rate Forecasting for Corn Crops. *Agron. J.* 71(6):1045-1051.
- Johnson, R. R. and Wax, L. M. 1981. Stand Establishment and Yield of Corn as Affected by Herbicides and Seed Vigor. *Agron. J.* 71(5):880-884.
- Kaiser, D. E.; Mallarino, A. P. and Sawyer, J. E. 2010. Utilization of Poultry Manure Phosphorus for Corn Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:2211-2222.
- Kang, S.; Shi, W. and Zhang, J. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research* 67:207-214.
- Kladivko, E. J.; Willoughby, G. L. and Santini, J. B. 2005. Corn Growth and Yield Response to Subsurface Drain Spacing on Clermont Silt Loam Soil. *Agron. J.* 97:1419-1428.
- Leeper, R. A.; Runge, E. C. A. and Wlaker, W. M. 1974. Effect of Plant-Available Stored Soil Moisture on Corn Yield: I. Constant Climatic Conditions. *Agron. J.* 66:723-727.
- Leeper, R. A.; Runge, E. C. A. and Wlaker, W. M. 1974. Effect of Plant-Available Stored Soil Moisture on Corn Yield: II. Variable Climatic Conditions. *Agron. J.* 66:728-733.
- Lesoing, G. W. and Francis, C. A. 1999. Strip Intercropping Effects on Yield Components of Corn, Grain Sorghum, and Soybean. *Agron. J.* 91:807-813.
- Li, J.; Xie, R. Z.; Wang, K. R.; Ming, B.; Guo, Y. Q.; Zhang, G. Q. and Li, S. K. 2015. Variations in Maize Dry Matter, Harvest Index, and Grain Yield with Plant Density. *Agron. J.* 107:829-834.
- Liang, B. C.; MacKenzie, A. F.; Kirby, P. C. and Remillard, M. 1991. Corn Production in Relation to Water Inputs and Heat Units. *Agron. J.* 83(5):794-799.
- Liebhardt, W. C. 1979. Corn Yield as Affected by Lime Rate and Type on a Coastal Plain Soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 43(5):985-988.
- Liegel, E. A. and Walsh, L. M. 1976. Evaluation of Sulfur-coated Urea (SCU) Applied to Irrigated Potatoes and Corn. *Agron. J.* 68(3):457-463.
- Lim, S. M.; Hooker, A. L.; Kinsey, J. G. and Smith, D. R. 1974. Comparative Grain Yields of Corn Hybrids in Normal and in Texas Male-Sterile Cytoplasm (cms-T) Infected with *Helminthosporium maydis* Race T and Disease Components of cms-T Corn Hybrids. *Crop Sci.* 14(2):190-195.

- Liu, G.; Hou, P.; Xie, R.; Ming, B.; Wang, K.; Liu, W.; Yang, Y.; Xu, W.; Chen, J. and Li, S. 2017. Nitrogen Uptake and Response to Radiation Distribution in the Canopy of High-Yield Maize. *Crop. Sci.* 59:1236-1247.
- Liu, G.; Hou, P.; Xie, R.; Ming, B.; Wang, K.; Xu, W.; Liu, W.; Yang, Y. and Li, S. 2017. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha⁻¹. *Field Crops Research.* 213:221-230.
- Mallarino, A. P. 1995. Evaluation of Excess Soil Phosphorus Supply for Corn by the Ear-Leaf Test. *Agron. J.* 87(4):687-691.
- Mallarino, A. P. and Blackmer, A. M. 1992. Comparison of Methods for Determining Critical Concentrations of Soil Test Phosphorus for Corn. *Agron. J.* 84(5):850-856.
- Mallarino, A. P.; Webb, J. R. and Blackmer, A. M. 1991. Corn and Soybean Yields during 11 Years of Phosphorus and Potassium Fertilization on a High-Testing Soil. *J. Prod. Agric.* 4:312-317.
- Mallarino, A. P.; Bergmann, N. and Kaiser, D. E. 2011. Corn Responses to In-Furrow Phosphorus and Potassium Starter Fertilizer Applications. *Agron. J.* 103:685-694.
- Moody, J. E.; Lillard, J. H. and Edminster, T. W. 1962. Mulching Tillage: Some Effects on Plant and Soil Properties. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 16(2):190-194.
- Moschler, W. W.; Martens, D. C.; Rich, C. I. and Shear, G. M. 1973. Comparative Lime Effects on Continuous No-Tillage and Conventionally Tilled Corn. *Agron. J.* 65(5):781-783.
- Mulvaney, R. L.; Khan, S. A. and Ellsworth, T. R. 2006. Need for a Soil-Based Approach in Managing Nitrogen Fertilizers for Profitable Corn Production. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:172-182.
- Olson, R. A.; Raun, W. R.; Chun, Y. S. and Skopp, J. 1986. Nitrogen Management and Interseeding Effects on Irrigated Corn and Sorghum and Soil Strength. *Agron. J.* 78:856-862.
- Oplinger, E. S. and Ohlrogge, A. L. 1974. Response of Corn and Soybeans to Field Applications of Copper. *Agron. J.* 66(4):568-571.
- Ottman, M. J. and Welch, L. F. 1988. Supplemental Radiation Effects on Senescence, Plant Nutrients, and Yield of Field-Grown Corn. *Agron. J.* 80(4):619-626.
- Pedersen, P. and Lauer, J. G. 2003. Corn and Soybean Response to Rotation Sequence, Row Spacing, and Tillage System. *Agron. J.* 95:965-971.

- Pendleton, J. W. and Egli, D. B. 1969. Potential Yield of Corn as Affected by Planting Date. *Agron. J.* 61:70-71.
- Pendleton, J. W.; Peters, D. B. and Peek, J. W. 1966. Role of Reflected Light in the Corn Ecosystem. *Agron. J.* 58:73-74.
- Porter, P. M.; Lauer, J. G.; Lueschen, W. E.; Ford, J. H.; Hoverstad, T. R.; Oplinger, E. S. and Crookston, R. K. 1997. Environment Affects the Corn and Soybean Rotation Effect. *Agron. J.* 89(3):442-448.
- Powell, N. L. and Wright, F. S. 1993. Grain Yield of Subsurface Microirrigated Corn as Affected by Irrigation Line Spacing. *Agron. J.* 85(6):1164-1169.
- Powell, R. D. and Webb, J. R. 1972. Effect of High Rates of N, P, K Fertilizer on Corn (*Zea mays* L.) Grain Yields. *Agron. J.* 64(5):653-656.
- Randall, G. W.; Vetsch, J. A. and Huffman, J. R. 2003. Corn Production on a Subsurface-Drained Mollisol as Affected by Time of Nitrogen Application and Nitrapyrin. *Agron. J.* 95(5):1213-1219.
- Roth, G. W., Beegle, D. B.; Heinbaugh, S. M. and Antle, M. E. 2006. Starter Fertilizers for Corn on Soils Testing High in Phosphorus in the Northeastern USA. *Agron. J.* 98:1121-1127.
- Ruiz-Diaz, D. A., Hawkins, J. A.; Sawyer, J. E. and Lundvall, J. P. 2008. Evaluation of In-Season Nitrogen Management Strategies for Corn Production. *Agron. J.* 100:1711-1719.
- Ruiz-Diaz, D. A., Sawyer, J. E. and Mallarino, A. P. 2011. On-Farm Evaluation of Poultry Manure as a Nitrogen Source for Corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:729-737.
- Salmerón, M.; Caveró, J.; Quílez, D. and Isla, R. 2010. Winter Cover Crops Affect Monoculture Maize Yield and Nitrogen Leaching under Irrigated Mediterranean Conditions. *Agron. J.* 102: 1700-1709.
- Sawyer, J. E.; Pedersen, P.; Barker, D. W.; Ruiz-Diaz, D. A. and Albrecht, K. 2010. Intercropping Corn and Kura Clover: Response to Nitrogen Fertilization. *Agron. J.* 102:568-574.
- Schepers, J. S.; Varvel, G. E. and Watts, D. G. 1995. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. *Jornal of Contaminant Hydrology.* 20:227-239.
- Schlegel, A. J. and Havlin, J. L. 2017. Corn Yield and Grain Nutrient Uptake from 50 Years of Nitrogen and Phosphorus Fertilization. *Agron. J.* 109:335-342.

- Schlegel, A. J.; Assefa, Y.; Bond, H. D.; Wetter, S. M. and Stone, L. R. 2015. Corn Response to Long-Term Applications of Cattle Manure, Swine Effluent, and Inorganic Nitrogen Fertilizer. *Agron. J.* 107:1701-1710.
- Shapiro, C.; Attia, A.; Ulloa, S. and Mainz, M. 2016. Use of Five Nitrogen Source and Placement Systems for Improved Nitrogen Management of Irrigated Corn. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 80(6):1663-1674.
- Shear, G. M. and Moschler, W. W. 1969. Continuous Corn by the No-Tillage and Conventional Tillage Methods: A Six-Year Comparison. *Agron. J.* 61(4):524-526.
- Soofi, G. S. and Fuehring, H. D. 1964. Nutrition of Corn on a Calcareous Soil: I, Interrelationships of N, P, K, Mg, and S on the Growth and Composition. *Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 28(1):76-79.
- Teare, I. D. and Wright, D. L. 1990. Corn Hybrid-Starter Fertilizer Interaction for Yield and Lodging. *Crop Sci.* 30(6):1298-1303.
- Webb, J. R.; Mallarino, A. P. and Blackmer, A. M. 1992. Effects of Residual and Annually Applied Phosphorus on Soil Test Values and Yields of Corn and Soybean. *J. Prod. Agric.* 5(1):148-152.
- Whigham, D. K. and Woolley, D. G. 1974. Effect of Leaf Orientation, Leaf area, and Plant Densities on Corn Production. *Agron. J.* 66(4):482-486.
- Wilhelm, W. W.; Mielke, L. N. and Gilley, J. R. 1985. Tillage and Low-Pressure Center-Pivot Irrigation Effects on Corn Yield. *Agron. J.* 77(2):258-263.
- Winter, S. R. and Ohlrogge, A. J. 1973. Leaf Angle, Leaf Area, and Corn (*Zea mays* L.) Yield. *Agron. J.* 65(3):395-397.
- Woli, K. P.; Rakshit, S.; Lundvall, J. P.; Sawyer, J. E. and Barker, D. W. 2012. On-Farm Evaluation of Liquid Swine Manure as a Nitrogen Source for Corn Production. *Agron. J.* 105:248-262.
- Woli, K. P.; Rakshit, S.; Lundvall, J. P.; Sawyer, J. E. and Barker, D. W. 2013. Liquid Swine Manure Application to Soybean and Residual-Year Nitrogen Supply to Corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:1684-1695.
- Woodruff, J. R.; Moore, F. W. and Musen, H. L. 1987. Potassium, Boron, Nitrogen, and Lime Effects on Corn Yield and Earleaf Nutrient Concentrations. *Agron. J.* 79(3):520-524.
- Yin, X. and McClure, M. A. 2013. Relationship of Corn Yield, Biomass, and Leaf Nitrogen with Normalized Difference Vegetation Index and Plant Height. *Agron. J.* 105:1005-1016.

- Yost, M. A.; Coulter, J. A.; Russelle, M. P.; Sheaffer, C. C. and Kaiser, D. E. 2012. Alfalfa Nitrogen Credit to First-Year Corn: Potassium, Regrowth, and Tillage Timing Effects. *Agron. J.* 104:953-962.
- Zhang, G.; Liu, C.; Xiao, C.; Xie, R.; Ming, B.; Hou, P.; Liu, G.; Xu, W.; Shen, D.; Wang, K. and Li, S. 2017. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China. *Field Crops Research* 211:137-146.
- Zhang, G.; Shen, D.; Ming, B.; Xie, R.; Jin, X.; Liu, C.; Hou, P.; Xue, J.; Che, J.; Zhang, W.; Liu, W.; Wang, K. and Li, S. 2019. Using irrigation intervals to optimize water-use efficiency and maize yield in Xinjiang, northwest China. *The Crop Journal*. 7:922-934.
- Zhang, X.; Ma, L.; Gilliam, F. S.; Wang, Q. and Li, C. 2012. Effects of raised-bed planting for enhanced summer maize yield on rhizosphere soil microbial functional groups and enzyme activity in Henan Province, China. *Field Crops Research* 130:28-37.
- Zheng, W.; Sui, C.; Liu, Z.; Geng, J.; Tian, X.; Yang, X.; Li, C. and Zhang, M. 2016. Long-Term Effects of Controlled-Release Urea on Crop Yields and Soil Fertility under Wheat-Corn Double Cropping Systems. *Agron. J.* 108:1703-1716.