



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO
ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

ÓPTIMOS ECONÓMICOS DE FERTILIZACIÓN EN MAÍZ PARA ELEVAR

LAS GANANCIAS DE LOS PRODUCTORES

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

PRESENTA:
Manuel Vargas Salgado

Bajo la supervisión de: Marcos Portillo Vázquez, Dr.



Chapingo, Texcoco, Estado de México, septiembre del 2020.

ÓPTIMOS ECONÓMICOS DE FERTILIZACIÓN EN MAÍZ PARA ELEVAR LAS
GANANCIAS DE LOS PRODUCTORES

Tesis realizada por **MANUEL VARGAS SALGADO** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:



DR. MARCOS PORTILLO VÁZQUEZ

ASESOR:



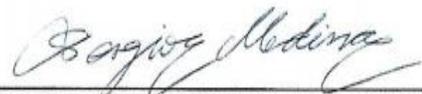
DR. JOSÉ DE JESÚS BRAMBILA PAZ

ASESOR:



DR. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ DAMIÁN

ASESOR:



DR. SERGIO ERNESTO MEDINA CUELLAR

LECTOR EXTERNO:



DR. JOSÉ MIGUEL OMAÑA SILVESTRE

CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 La importancia	14
1.3 Justificación	15
1.4 Antecedentes.....	16
1.5 Objetivos.....	17
1.6 Hipótesis.....	17
1.7 Presentación.....	18
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1 La función de producción.....	19
2.1.1 Producto total, medio y marginal.....	22
2.2 Los costos.....	23
2.3 La maximización de la ganancia o beneficio a corto plazo	25
2.4 Revisión de algunos artículos científicos	29
3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 El experimento de maíz de 2017	35
3.1.1 La semilla de maíz blanco H-377	36
3.1.2 Diseño de tratamientos	36
3.1.3 La cosecha.....	37
3.2 El experimento de maíz de 2018	38
3.2.1 Las variedades e híbrido de maíz	38
3.2.2 Diseño de tratamientos	39
3.2.3 La cosecha.....	40
3.3 El experimento de maíz de 2019	41
3.3.1 Análisis de suelo y diseño de tratamientos	41
3.3.2 Fórmula de nutrición edáfica	43
3.3.3 Variedades e híbridos de maíz.....	43

3.3.4	Diseño de tratamientos	44
3.3.5	La cosecha.....	44
4.	LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO BLANCO EN MÉXICO, BASE DE LA ALIMENTACIÓN DE LOS MEXICANOS	45
4.1	Resumen	45
4.2	Introducción	47
4.3	Objetivos.....	47
4.4	Metodología	48
4.5	Resultados.....	48
4.6	Conclusiones	51
4.7	Bibliografía.....	51
4.8	Anexo.....	53
5.	ÓPTIMOS ECONÓMICOS DE FERTILIZANTE EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BLANCO EN VALLES ALTOS	56
5.1	Resumen	56
5.2	Summary	57
5.3	Introducción	58
5.4	Materiales y métodos.....	61
5.4.1	El análisis de suelo y la fórmula de fertilización	69
5.4.2	Diseño de tratamientos	70
5.5	Resultados y discusión	72
5.5.1	La función de producción cuadrática.....	75
5.5.2	Conclusiones.....	80
5.5.3	Literatura citada.....	81
6.	Anexos	84

LISTA DE CUADROS.

Cuadro 1. Porcentaje de nutrientes en la fórmula de fertilizante de la primera y segunda aplicación.	36
Cuadro 2. Tratamientos, primera aplicación (YaraMila STAR) y segunda (YaraBela NITROMAG) de fertilizante en kg/ha y contenidos de N, P, K, S, Mn, y Zn en kg/ha.....	37
Cuadro 3. Tratamientos, primera y segunda aplicación de fertilizante (YaraBela NITROMAG) en kg/ha y contenidos de N y Mg en kg/ha.....	40
Cuadro 4. Resultado del análisis de suelo y fórmula de fertilización.	42
Cuadro 5. Dosis de fertilización óptima con base en el análisis de suelo.	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la parcela X-11 en Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo.	35
Figura 2. Parcela Campo San Juan Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo.	38

DEDICATORIAS

A mis hijas Diana y Beatriz Elena y a mi hijo Manuel Alejandro por ser el motor de mis proyectos en la vida. A Beatriz por el tiempo que compartimos juntos y por los hijos que procreamos.

A mi madre, María Irene Salgado Bahena, por darme la vida y el ejemplo de perseverancia para lograr lo mejor de la vida y para hacer el bien al prójimo.

A mi abuelo, Manuel Vargas López, quien, ante la muerte de mi padre, asumió la responsabilidad de crearme y darme el ejemplo de honestidad y rectitud ante los demás. También a mis abuelitas Emelia Aranda y Francisca Bahena y mi abuelo Camerino Salgado por inculcarme principios y grandes valores.

A mi pequeña y adorable nieta, María Valeria, por traernos la alegría al hogar y ser la esperanza de un futuro mejor para las mujeres mexicanas.

A mis hermanas, Leonila y María Elena por todas las vivencias que compartimos juntos. Y a la memoria de mi hermano Emiliano, ejemplo de un buen hombre.

A todos los demás familiares: tías, tíos, primas, primos, sobrinas y sobrinos, esperando no omitir a nadie, sirva esta sincera dedicatoria.

A los campesinos, agricultores y productores de maíz por brindarnos la comida de cada día a la mayoría de los mexicanos.

A mis amigos y compañeros del doctorado.

“El invento del maíz por los mexicanos, sólo es comparable con el invento del fuego por el hombre”.

Poeta Octavio Paz

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, ¡Mi Alma Mater! Por el acervo de conocimientos recibido en su recinto y gracias a su apoyo para mi formación y sustento desde los estudios de preparatoria, pasando por la licenciatura hasta el doctorado. ¡Mi agradecimiento a esta gloriosa y noble institución!

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, quien contribuyó con las becas para mi manutención durante el posgrado. ¡Mi agradecimiento!

Al Dr. Marcos Portillo Vázquez, por su aportación de conocimientos en mi formación profesional y por su atinada dirección de esta tesis doctoral.

Al Dr. José de Jesús Brambila Paz, por sus enseñanzas en los cursos recibidos de él y por sus valiosas observaciones en esta investigación.

Al Dr. Miguel Ángel Martínez Damián, quién me aportó valiosos conocimientos durante el doctorado y por sus certeras contribuciones en la presente tesis.

Al Dr. Sergio Ernesto Medina Cuellar, por sus oportunos comentarios y la Codirección de esta investigación.

¡A todas estas instituciones y a los investigadores antes mencionados, mis más altos agradecimientos!

DATOS BIOGRÁFICOS.

Manuel Vargas Salgado, nació el 24 de agosto de 1958 en Buenavista del Aire, Guerrero, México. CURP: VASM580824HGRRLN03. Realizó su bachillerato de 1975 a 1978 en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México. De 1978 a 1982 cursó su licenciatura en la misma universidad obteniendo el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Economía Agrícola, con Cédula profesional 1314438. Durante 1986 y 1987 estudió la maestría en Economía en el Colegio de Postgraduados, para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Economía, con número de Cédula profesional 1124352. En agosto de 2016 inició el Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo que culminará en diciembre de 2020.

Manuel ha desarrollado su vida profesional principalmente en instituciones de investigación, docencia, difusión de la cultura y servicio universitario. Desde que cursaba el penúltimo año de la licenciatura ingresó a laborar en el departamento de Economía del Colegio de Postgraduados, primero como ayudante y después como asistente de investigación. Al concluir sus estudios de maestría, ingresó en 1988 a trabajar de tiempo completo en el Departamento de Economía Agrícola, hoy División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo, como Profesor-Investigador, realizando actividades de docencia, investigación y servicio.

Al paralelo de las actividades arriba mencionadas, el maestro Vargas ha realizado también evaluaciones socioeconómicas de programas gubernamentales como los de Alianza para el Campo, Fondo Nacional de Empresas Sociales y algunos estudios técnicos como el de Rentabilidad y Ventajas Comparativas del Cacahuete en el Estado de Morelos, México.

RESUMEN GENERAL

ÓPTIMOS ECONÓMICOS DE FERTILIZACIÓN EN MAÍZ PARA ELEVAR LAS GANANCIAS DE LOS PRODUCTORES¹

El maíz es el principal grano que se produce, comercia y consume al nivel mundial. En México tiene relevancia económica, social, cultural, de biodiversidad y gastronómica. Es el alimento básico en la dieta de la mayoría de los mexicanos. En la producción nacional de maíz subsisten varios sistemas de producción, desde la Milpa con campesinos que usan pocos insumos y producen para autoconsumo, el sistema intermedio conformado de agricultores medianos que emplean más insumos y generan una parte de grano para autoconsumo y el resto para el mercado y el comercial constituido por productores grandes que emplean un paquete tecnológico muy completo y venden todo su producto. Los productores que emplean elevadas densidades de siembra, altas dosis de fertilización y obtienen los mayores rendimientos de grano, no logran necesariamente la máxima ganancia o beneficio económico. En cambio, productores de maíz que aplican cantidades óptimas económicas de fertilizante obtienen mayores beneficios. La presente investigación tuvo como propósito obtener los óptimos económicos de fertilizante en maíz mediante tres experimentos que se realizaron en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo de 2017 a 2019. Para lograr este objetivo se emplearon semillas de maíz blanco híbrido H-377 y H-155 y la variedad Estrella de maíz crema y la Celeste de maíz azul. Los primeros dos años se emplearon dos fórmulas comerciales de fertilizante y el tercero se hizo un análisis de suelo y con base en éste se empleó una fórmula balanceada. Los resultados indican que los rendimientos de grano responden positivamente a la aplicación de diferentes cantidades de fertilizante y que los óptimos económicos obtenidos le permiten lograr la mayor ganancia a los productores.

Palabras Clave: función de producción, máxima ganancia, máximo rendimiento.

¹Tesis de Doctorado en Ciencias, Programa Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Manuel Vargas Salgado.

Director de Tesis: Dr. Marcos Portillo Vázquez.

ABSTRACT

OPTIMAL ECONOMIC FERTILIZATION IN MAIZE TO RAISE PRODUCERS' PROFITS²

Corn is the main grain produced, traded, and consumed worldwide. In Mexico it has economic, social, cultural, biodiversity and gastronomic relevance. It is the staple food in the diet of most Mexicans. In domestic maize production, several production systems remain, from the Milpa with farmers who use few inputs and produce for self-consumption, the intermediate system made up of medium-sized farmers who use more inputs and generate a part of grain for self-consumption and the rest for the market and commercial system consisting of large producers who use a very complete technological package and sell all their product. Producers who employ high planting densities, high doses of fertilization and obtain the highest grain yields do not necessarily achieve maximum gain or economic benefit. By contrast, maize producers who apply optimal economic amounts of fertilizer make greater profits. The purpose of this research was to obtain the optimal economic fertilizer in maize through three experiments that were carried out in the Experimental Agricultural Field of the Chapingo Autonomous University from 2017 to 2019. To achieve this goal, hybrid white maize seeds H-377 and H-155 and the Estrella variety of cream maize and Blue Corn Celeste were used. The first two years, two commercial fertilizer formulas were used and the third one, a balanced formula was employed as a result from a soil analysis. The results indicate that grain yields respond positively to the application of different amounts of fertilizer and that the optimal economics obtained allow producers to achieve the highest profit.

Keywords: production function, maximum profit, maximum performance.

²PhD Thesis in Sciences, Doctoral Program in Agricultural Economics, Chapingo Autonomous University.

Author: Manuel Vargas Salgado.

Thesis Director: Dr. Marcos Portillo Vázquez.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El maíz (*Zea mays* L.) es el principal cereal que se produce, comercia y consume al nivel mundial. En México tiene una gran relevancia económica, social, cultural, de biodiversidad y gastronómica en la sociedad mexicana, toda vez que, es el cereal más relevante en términos de producción, empleo y consumo en la alimentación de los mexicanos, a través de más de 600 formas reconocidas de preparación y presentación en los hogares y en la agroindustria del país, como tortillas, tamales, atoles, almidones, aceites, entre otras presentaciones, por esa razón el consumo anual per cápita de grano de maíz fue de 345.6 kg en 2018 (SAGARPA-SIAP, 2019). Debido a la importancia que reviste este grano, lo coloca como un producto estratégico en el objetivo de alcanzar la autosuficiencia y la soberanía alimentaria nacional, para no depender del mercado externo para satisfacer el consumo nacional. No obstante y a pesar de ser México, el centro de origen a nivel mundial de este grano, no se produce todo el maíz que la sociedad mexicana requiere para satisfacer sus necesidades alimenticias, por esa razón, se importó en 2018 más de la mitad (56 por ciento) de la cantidad producida y necesaria para satisfacer el consumo aparente nacional -entendido éste, como la producción, más las importaciones, menos las exportaciones, más el inventario inicial, menos el inventario final-, aunque la mayor parte fue de maíz amarillo, materia prima necesaria para elaborar alimentos balanceados para el ganado, principalmente y como materia prima para la agroindustria.

La producción de maíz blanco y de colores se realiza en la mayoría de las áreas agrícolas de México, con cerca de 64 razas de maíces seleccionados en miles de años por grupos indígenas y mestizos y con híbridos y variedades mejoradas. Los sistemas de producción y las tecnologías empleadas por los productores varían desde las tradicionales, las intermedias hasta las más modernas que usan paquetes tecnológicos avanzados. Existen productores que aplican altas dosis de fertilizantes y densidades de siembra elevadas, con procesos muy mecanizados y obtienen los más altos rendimientos por hectárea; pero hay otros

agricultores que aplican menores dosis de fertilización, obtienen más bajos rendimientos; pero logran mayores ganancias.

La respuesta de especialistas en economía agrícola y en fitotecnia a esta situación, es que seguramente los productores están aplicando sobredosis de insumos con las cuales los incrementos en rendimiento de las últimas unidades de insumo (fertilizante, por ejemplo) no son suficientes para cubrir sus respectivos incrementos en costos.

Se ha encontrado en algunas investigaciones (Martínez, 1971; Portillo, 2015) que las primeras unidades de insumo aplicadas al suelo son altamente productivas, pero se llega a un nivel de su aplicación en que cada unidad agregada de fertilizante tiene incrementos cada vez menores, que no pagan su costo.

Lo anterior constituye un problema económico para los productores de maíz, toda vez que, si aplican cantidades de insumos superiores a las necesarias, desde el punto de vista del óptimo económico, no están recuperando el costo de estas unidades adicionales y, por lo tanto, pueden estar perdiendo o no lograr el máximo beneficio económico; no obstante, tener altos rendimientos de maíz por hectárea. Desde el punto de vista de la teoría económica, el objetivo que persigue todo empresario (productor) en la producción de bienes y servicios es maximizar las ganancias o los beneficios económicos en el proceso de producción (Mas-Colell, et al., 1995 & Nicholson y Snyder, 2010). Por esta razón los productores y empresarios agrícolas que producen maíz principalmente para el abastecer el mercado nacional, se asume que tienen como objetivo fundamental maximizar las ganancias derivadas de su actividad. Pero para lograr este objetivo los productores, deben aplicar la dosis óptima económica de fertilizante que les permita alcanzar la máxima ganancia. Lograr este objetivo aplicar cantidades óptimas de nutrientes desde el punto de vista técnico y económico que contaminen el medio ambiente y que preserven el uso de los recursos del productor para realizar una agricultura sustentable.

La ciencia económica plantea que todo agente económico (consumidores y productores) responde a los incentivos económicos, en el caso de los

productores y empresarios agrícolas su incentivo económico es obtener la máxima ganancia. Bajo esta lógica los productores agrícolas de maíz medianos y grandes con una mentalidad empresarial estarían movidos por este incentivo y en la medida que logren su objetivo estarían dispuestos a producir mayores cantidades de maíz. Aquí habría que enfatizar que las políticas agrícolas y de abasto del Estado para alcanzar la seguridad alimentaría, posibilitando que todos los hogares tengan acceso real a alimentos adecuados para todos sus miembros y que no corran el riesgo de perder este acceso, implica seguir garantizando la producción de maíz blanco para consumo humano para seguir siendo autosuficientes en este alimento básico. Sin embargo, si se quiere depender menos de las importaciones de maíz amarillo y alcanzar la autosuficiencia en este renglón se debe incentivar la producción de este grano para abastecer la demanda pecuaria de alimentos balanceados y la de la agroindustria nacional.

Los productores pequeños minifundistas no cuentan con la tierra necesaria ni con los insumos suficientes para producir la cantidad de maíz, que les permita obtener un beneficio económico suficiente para que vivan ellos y sus familias en condiciones dignas; no obstante, la pequeña superficie y los recursos escasos que poseen, los deben emplear de manera eficiente, de tal forma que los beneficios económicos que obtengan de esta actividad sean los más altos posible y ello lo lograrán aplicando una dosis óptima de fertilizante y empleando prácticas agronómicas acorde a sus condiciones locales y socioeconómicas particulares, priorizando la diversidad de sus semillas y la protección del medio ambiente

En el caso de los productores pequeños habría que plantearse y responder las siguientes preguntas: **¿Qué cantidades de fertilizante deben emplear los agricultores para generar la máxima ganancia de la inversión en este insumo? ¿Cuál es el nivel de uso de fertilizante que genera la mayor tasa de conversión de este insumo en grano (máxima ganancia por peso invertido en fertilizante)?**

En el presente trabajo se propuso identificar en experimentos de campo, las dosis óptimas económicas de fertilizante (F) para que los productores logren la

máxima ganancia. El experimento se realizó en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo durante los ciclos primavera-verano 2017, 2018 y 2019. En el primer año se empleó un arreglo de bloques continuos y en los otros dos se usó un diseño experimental completamente al azar.

1.2 La importancia

La trascendencia de investigar y obtener dosis óptimas económicas en la producción de maíz estriba en que, para que esta producción se siga realizando y se expanda entre un mayor número de productores, debe haber un incentivo económico que los motive a realizar con mayor empeño esta actividad, ese incentivo es la rentabilidad del cultivo a través de obtener mayores beneficios económicos empleando dosis óptimas económicas de fertilizantes. Esto implica emplear un criterio económico en las decisiones que toman los productores de maíz para realizar esta actividad en lugar de otra alternativa. Muchas veces los técnicos agrícolas que los asesoran les recomiendan una semilla mejorada con un alto potencial genético, que les permita obtener los mayores rendimientos, lo cual va aunado con un paquete tecnológico muy completo; pero de un elevado costo. Esta recomendación no los lleva necesariamente a obtener la máxima ganancia o el mayor beneficio económico, por lo que los técnicos deberían emplear criterios de optimización económica para que los productores obtengan rendimientos por hectárea de maíz que les brinden máximos beneficios.

El presente Gobierno está operando los Proyectos y Programas Prioritarios de Fertilizantes para el Bienestar, Precios de Garantía a Productores del Campo y Canasta Básica de Alimentos que están estrechamente relacionados con la producción y el consumo de maíz y de otros alimentos básicos para alcanzar la meta de la seguridad alimentaria, sobre todo dando prioridad a los pequeños y medianos productores de maíz y a la población que se ubica en zonas de alto y muy alto grado de marginación. En el caso de los fertilizantes se asume que contribuirán al mejoramiento de la productividad; con los precios de garantía buscan incrementar el ingreso de los pequeños productores agropecuarios, para mejorar su nivel de vida y estimular la producción de granos básicos para reducir la dependencia de las importaciones y en la canasta básica figuran en primer

lugar el maíz y en quinto la harina de maíz enriquecida. Queda la inquietud si los productores harán un uso óptimo de ese fertilizante que reciban, sin el acompañamiento técnico, para que eleven su ingreso. Mientras que los precios de garantía incentivarán principalmente la producción de maíz blanco y no la de maíz amarillo, en el cual el país es deficitario y con ello no se logrará la autosuficiencia en este grano.

1.3 Justificación

Los resultados obtenidos en la presente investigación los podrán adoptar y aplicar en primera instancia los productores de maíz del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) y el Centro de Desarrollo Rural (CADER) de Texcoco, Estado de México. Quienes tienen condiciones de suelos y agroclimáticas similares a las del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo donde se realizaron los experimentos. En segunda instancia los pueden emplear los agricultores de los Valles Altos de las entidades de Puebla, Tlaxcala y Estado de México, quienes asisten cada año a la Presentación de Resultados de Investigación de este Campo y han mostrado interés por las semillas que se han probado en los experimentos y por las dosis de fertilización que se aplican.

La producción de maíz en México se concentra principalmente en diez entidades que produjeron en 2018 el 79 por ciento de la producción nacional. Los estados de Sinaloa, Jalisco, Michoacán y Estado de México aportaron el 50 por ciento del grano (SIAP, 2019). La mayoría de los productores de estas entidades producen maíz para la venta en el mercado de este grano y emplean un paquete tecnológico que incluye fertilizante, semilla mejorada, herbicidas, pesticidas y maquinaria agrícola, principalmente. Siempre buscan obtener los más altos rendimientos de grano por hectárea y venderlo al mejor precio posible para percibir el máximo ingreso; pero a este ingreso le deben deducir los costos de producción del cultivo para obtener su ganancia; sin embargo, quizás ésta no sea la máxima que puedan obtener; pero si cuentan con la asesoría de un técnico o un economista agrícola que les oriente como optimizar sus recursos podrán lograr los mayores beneficios.

El cultivo del maíz es el principal cereal de la dieta de la mayoría de los mexicanos, es la base de la alimentación de la población, sobre todo de la de más bajos ingresos, ya que les aporta el 30 por ciento de la proteína y el 40 por ciento de la energía requerida en su nutrición (CIMMYT, 2019), por esta razón, es una prioridad del Estado mexicano garantizar el abasto de maíz a precios bajos. Este propósito se podrá lograr más rápido en la medida que los productores produzcan más eficientemente este cereal.

1.4 Antecedentes

Durante la segunda mitad del siglo pasado se realizaron una gran cantidad de investigaciones en el campo de economía de la producción aplicadas a muchas actividades de los sectores agrícola y pecuario en diferentes países del orbe mundial. En estas investigaciones se han usado diferentes formas funcionales polinomiales como la cuadrática, la raíz cuadrada, la trascendental y la logarítmica para representar la respuesta de los rendimientos de algunos cultivos al uso de diferentes niveles de fertilizante. Sin embargo, la función cuadrática es la que más ampliamente se ha utilizado (Heady 1952 y 1981; Heady y Dillon 1961; Mead y Pike 1975; Nelson, Voss y Pesek 1985, citados por Jauregui y Sain, 1992). La razón de su empleo estriba en que se generaliza fácilmente a modelos con más de un nutriente y permite una fácil interpretación de efectos lineales, curvilíneos y de interacción. No obstante, las características negativas de la función cuadrática son su patrón de respuesta simétrica y su pobre representación de una meseta o parte plana de la función.

Dentro de algunos ejemplos de estos estudios, está la investigación derivada de un subconjunto de datos tomados de los experimentos en parcelas descritos por Hobbs et al. (1986) and Razzaq et al. (1990) sobre fertilización nitrogenada de trigo en el norte de Punjab, Paquistán. La respuesta del trigo a N y P en la Pampa Húmeda, Argentina, la obtuvo Senigaglia et al. (1983) en algunos experimentos en los campos de los agricultores. Donde ajustó el modelo polinomial cuadrático.

En el caso de México en los años sesenta y setenta del siglo pasado se hicieron muchos trabajos con funciones de respuesta de fertilizante o funciones de producción para modelar la respuesta de los rendimientos de algunos cultivos a

diferentes dosis de fertilización, tal es el caso de caña de azúcar (IMPA, 1965; Martínez-Garza, 1963; Jarero, 1970, citados por Martínez,1971).

1.5 Objetivos

General

Identificar la respuesta en rendimiento de distintas variedades de maíz a diferentes dosis de fertilización en el Campo Agrícola Experimental de la UACH. Para determinar la dosis de máxima eficiencia, la óptima económica y la de máxima producción.

Específicos

Determinar la dosis de máxima eficiencia, la óptima económica y la de máximo rendimiento de fertilizante para obtener la máxima eficiencia por peso gastado en este insumo, la máxima ganancia y el mayor rendimiento.

Identificar en cada caso experimentado el dominio territorial de las recomendaciones generadas con los resultados de los experimentos. Para el área productiva con condiciones agroecológicas similares a la del sitio experimental, que son el Centro de Desarrollo Rural (CADER), el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) de Texcoco, Estado de México y las zonas aledañas de los Valles Altos.

Con los resultados obtenidos y con base en los objetivos anteriores formular una recomendación de fertilización para las condiciones climáticas (temperaturas, fertilidad de suelo, precipitación) similares a la zona de influencia del sitio experimental y con las mismas variedades de maíz probadas.

1.6 Hipótesis

Existe una cantidad óptima económica de fertilizante que los productores de maíz deben emplear para generar la máxima ganancia de la inversión en este insumo. Asimismo, también existe un nivel de uso de fertilizante que genera la mayor tasa de conversión de este recurso en grano (máxima ganancia por peso invertido en fertilizante) y conveniente para productores pequeños de baja capacidad de inversión.

1.7 Presentación

La presente investigación está estructurada en seis capítulos. El capítulo 1 consta de la introducción general, donde se describe el problema general de la investigación, la importancia, la justificación, los antecedentes, los objetivos, la hipótesis y una breve presentación de cada capítulo de la tesis.

En el capítulo 2 se hace una exhaustiva revisión de la literatura sobre los antecedentes más relevantes de la teoría de la producción, que conforma el marco teórico de la presente investigación, analizando las aportaciones recientes y su aplicación en trabajos empíricos que han sido publicados en artículos científicos hasta llegar a lo que sería el estado actual de este cuerpo de conocimientos.

En el capítulo 3 se describe ampliamente la metodología, junto con los materiales y métodos empleados en los experimentos realizados en campo para medir la respuesta de los diferentes híbridos y variedades mejoradas de maíz blanco y azul a distintas dosis de fertilización, para construir funciones de producción que permitan determinar las dosis óptimas de este insumo, de máxima eficiencia, y ganancia y de alto rendimiento.

En el capítulo 4 se presenta la ponencia (comunicación): “La producción de maíz grano blanco en México, base de la alimentación de los mexicanos”. La cual fue aceptada y presentada como Poster en el Congreso Interamericano de Estudios Rurales CIER XII, celebrado en Segovia, España, del 4 al 6 de julio de 2018. Cuyo objetivo fue demostrar con indicadores numéricos que el maíz grano blanco es la base de la alimentación de los mexicanos y que, al menos en el mediano plazo, continuará cumpliendo esta función. Se anexa el resumen que fue publicado en: 29062_ActasCongresolberoamericano_WEB.pdf

El capítulo 5 consiste en el artículo científico: “Óptimos económicos de fertilización en la producción de maíz blanco en Valles Altos”. Recibido en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas del INIFAP, REMEXCA, y en proceso de revisión técnica para su publicación. El objetivo fue estimar las dosis óptimas económicas de fertilizante en experimentos de campo que permita a productores lograr la máxima ganancia de la inversión en este recurso.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Para estudiar el fenómeno de la producción de un producto o de un bien o servicio, desde el punto de vista de la economía implica utilizar la teoría de la producción en general y de un conjunto de principios económicos que se han desarrollado a lo largo de la evolución de este campo del conocimiento científico de las ciencias sociales en particular. La ciencia económica se divide en dos grandes ramas, a saber: La microeconomía y la macroeconomía. La microeconomía se ocupa de estudiar el comportamiento y la conducta de los agentes económicos, como los individuos, las familias o los hogares y las empresas y su relación a través de los mercados de los factores de la producción y de los mercados de los bienes y servicios. En tanto que la macroeconomía se encarga del estudio de la economía en su conjunto a través de los grandes agregados como el producto interno bruto, el nivel general de empleo, el nivel general de precios o la inflación, la inversión, el ahorro y la balanza de pagos, entre otros (Nicholson, 2002 & Dornbusch, 1994).

2.1 La función de producción

La teoría de la producción de la empresa, la teoría de costos y la optimización económica son parte del campo de la microeconomía. Estas teorías son las que conforman el marco teórico empleado en esta investigación, junto con los conocimientos usados de la disciplina estadística, de las matemáticas y de la econometría.

El concepto de función de producción desarrollado en teoría de la producción de la empresa y su estrecha relación con los costos de producción, muchos autores los han abordado de la siguiente manera: Hablar de la producción implica moverse del lado de la oferta de la economía, analizando el proceso por el cual los bienes y servicios consumidos por los individuos son producidos. La oferta está compuesta de un número de unidades productivas llamadas "firmas" o empresas. Las firmas pueden ser corporaciones u otro tipo de negocios legalmente constituidos y reconocidos. Pero ellas pueden representar también las posibilidades productivas de los individuos o de los hogares. Además, el conjunto de firmas puede incluir algunas unidades productivas potenciales que

no están realmente organizadas. Por lo tanto, la teoría será capaz de acomodar los procesos de producción activos y los potenciales, pero inactivos. El modelo de posibilidades de producción es muy parsimonioso: La empresa es vista como una “caja negra”, capaz de transformar insumos en productos (Mas-Colell, Whinston, & Green, 1995).

La principal actividad de una empresa es transformar insumos en productos. En virtud de que los economistas están interesados en las elecciones que hacen estas para alcanzar este objetivo, pero desean esquivar muchas de las discusiones de la intrincada ingeniería que envuelve, ellos han elegido construir un modelo abstracto de producción. En este modelo la relación entre insumos y productos es formalizada por una función de producción de la forma $Q = f(K, L, M, \dots)$, donde q es el producto de la empresa de un bien particular en un periodo, K representa la máquina (esto es, capital), usada durante el periodo, L representa las horas del insumo trabajo, M la materia prima usada y la notación indica la posibilidad de otras variables afectando el proceso de producción. La ecuación de arriba, se supone que proporciona, para cualquier conjunto concebible de insumos, la solución del ingeniero al problema de la mejor manera de combinar esos insumos para obtener productos (Nicholson, 2002).

La economía de la producción comprende el estudio del proceso de producción de una empresa, una industria y/o una unidad de producción y su intrínseca relación con los costos de producción. La producción es el proceso de combinar y coordinar materias primas y fuerzas (insumos, factores, recursos o servicios productivos) en la elaboración de un bien o servicio (producto). Una representación abstracta de un proceso de producción está determinada por una función de producción, la cual es una descripción cuantitativa o matemática de varias posibilidades técnicas de producción enfrentadas por una empresa. La función de producción genera el máximo producto(s) en términos físicos para cada nivel de insumos en términos físicos (Beattie and Taylor, 1993, p. 3).

La especificación matemática de una función de producción puede ir desde un rango de funciones simples algebraicas, tales como una función cuadrática relacionando la producción de maíz con una tasa de fertilización de nitrógeno, hasta un sistema de ecuaciones muy complejo, tal como un modelo detallado del

crecimiento de plantas de maíz en respuesta a la fertilización de nitrógeno. El grado de complejidad matemática de una función de producción depende del proceso de producción y del grado de precisión deseado (Beattie and Taylor, 1993).

Durante el desarrollo de la teoría económica el investigador ha hecho uso de las funciones de producción matemáticas o modelos económicos, para analizar cuantitativamente los fenómenos de la producción. En general, esta clase de fenómenos representados por su modelo económico, son susceptibles de medición. Considerando un proceso sencillo de producción donde una empresa emplea p insumos variables y uno o más insumos fijos para producir y unidades de un determinado producto. La función de producción de la empresa plantea que la cantidad (esperada) de su producto $E(y)$, se puede expresar como una función de las cantidades de insumos variables, X_1, X_2, \dots, X_p , esto es:

$$E(y) = f(X_1, X_2, \dots, X_p), X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, p, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.1)$$

la cual se asume que es una función continua, univalorada, con derivadas parciales de primero y segundo orden continuas (Martínez, 1982).

Con base en la discusión de los autores antes citados, la función de producción puede definirse como una expresión matemática de la relación entre los recursos escasos de una empresa (los insumos) y la máxima producción que resulta del uso de esos recursos, dada una cierta tecnología o estado del arte. La función de producción asocia a cada conjunto de insumos (servicios de los factores por período) el máximo nivel de producción por período alcanzable con base en las posibilidades técnicas. El análisis del costo económico puede entonces ser visto como la aplicación de una unidad monetaria para medir el valor de uso de este insumo en el proceso de producción.

Para un periodo dado, en la producción resulta importante distinguir entre factores fijos y factores variables. Los factores fijos son aquellos que no pueden alterarse en un período corto; es decir, no cambian durante el proceso de producción, ni con la cantidad producida en ese periodo. Algunos ejemplos son: El capital físico, la superficie sembrada y la cantidad de semilla, entre otros insumos. Mientras que los factores variables son aquellos cuya cantidad

empleada depende de la cantidad de producto a generar, tales como: El factor trabajo, las materias primas y la cantidad de fertilizante. Con base en esta distinción entre insumos fijos e insumos variables, se pueden definir dos periodos de tiempo en la producción: El corto y el largo plazo. El corto plazo será un periodo en el que al menos un factor productivo es fijo para la empresa. El largo plazo será un periodo lo suficientemente largo para que la empresa pueda alterar todos sus factores de producción.

Existen dos conceptos importantes asociados a la producción: La eficiencia tecnológica y la eficiencia económica. **La eficiencia tecnológica** ocurre cuando la empresa genera una determinada producción empleando la menor cantidad posible de insumos. **La eficiencia económica** se alcanza cuando la empresa genera una determinada producción al menor costo posible (Parkin et al., 2011).

2.1.1 Producto total, medio y marginal

En el corto plazo, la única manera de aumentar el nivel de producción es incrementando los factores de producción variables (como el trabajo o el fertilizante) mientras todos los demás insumos se mantienen constantes (*ceteris paribus*). En el análisis de corto plazo de la función de producción, tres términos diferentes además de la cantidad de la producción son mediciones importantes del resultado, los cuales son el producto total, producto marginal y producto medio.

Producto físico total o producto total (PT): La curva de producto total muestra la relación entre la cantidad de factor variable y la mayor cantidad de producto, *ceteris paribus*.

Producto físico marginal o producto marginal (*PMg*): Se define como el incremento o cambio en el producto total derivado de añadir una unidad adicional de factor variable, *ceteris paribus*. Si X es el insumo variable, entonces $PMg_x = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$, manteniéndose constantes los demás insumos, esta fórmula se aplica en el caso de información puntual o discreta y su estimación es aproximada. Mientras que, si se tiene información continua, como la que se obtiene con una función de

producción, la fórmula de cálculo exacta en un punto determinado de la función es: $PM_{gx} = \frac{\partial Y}{\partial X}$.

Producto físico medio o producto medio (PM_{ex}): Se define como el nivel de producción por unidad de factor variable, *ceteris paribus*. $PM_{ex} = \frac{Y}{X}$. Un ejemplo de este producto medio es el rendimiento de maíz por ha obtenido con una cierta cantidad de fertilizante.

En la literatura microeconómica se señala que el producto total, el producto marginal y el producto medio se pueden representar mediante curvas estrechamente relacionadas entre sí, cuando se grafican las cantidades adicionales del insumo variable y la producción que resulta de estos incrementos, manteniendo todos los demás factores de producción constantes. De hecho, la curva del producto marginal no es más que, la gráfica de la pendiente del producto total. Sin embargo, dichas curvas son distintas para diferentes empresas y para distintos tipos de bienes. Aunque se asume que las formas de las curvas de producto son similares, toda vez que todos los procesos de producción poseen dos características: Rendimientos marginales crecientes, al principio y rendimientos marginales decrecientes, más adelante. Este último fenómeno es tan intenso que se ha dado en llamar “ley de los rendimientos decrecientes”, la cual plantea que: En la medida que una empresa emplea más de un recurso variable, con una cantidad de insumos fijos, el producto marginal del insumo variable disminuirá (Parkin, et al., 2011).

2.2 Los costos

Todos los insumos que emplea todo empresario o productor en el proceso de producción tienen un costo, que paga éste por el alquiler o el uso de ellos. El costo que paga por estos factores de producción es equivalente al precio que tienen dichos insumos en el mercado. En el caso de los productores agrícolas se supone que operan en un mercado de competencia perfecta o cercana a esta estructura de mercado, debido a la mínima participación que tienen en éste y porque no tienen poder de mercado para influir, de manera individual, en los precios de los factores que compran, ni el precio de los productos que venden, entonces son tomadores de precios.

En la literatura económica existe un concepto de costo muy importante que es el costo de oportunidad. Los economistas lo definen como el ingreso al que se renuncia cuando se emprende una actividad, la tasa de ganancia en la mejor alternativa. El costo de oportunidad de cualquier acción es la alternativa de mayor valor a la que se renuncia. En el caso del productor agrícola el costo de oportunidad de emplear su tierra para producir maíz es el ingreso al que renuncia por no rentarla. El costo de oportunidad de su trabajo o el de su familia por trabajar en su propia parcela es el ingreso o el salario al que renuncian por no trabajar fuera de su terreno en otra actividad similar. En general el capital que tiene invertido el empresario en su empresa es la tasa de interés a la que renuncia por no tenerlo invertido en una institución financiera. Por estas razones, los economistas sugieren que todos los recursos usados en la producción deben ser tomados en cuenta y valorados en su costo de oportunidad.

Para generar más producción en el corto plazo, la empresa debe emplear más insumo variable, lo cual implica aumentar sus costos, esto es debido a la estrecha relación que existe entre el proceso de producción de un bien, que es una relación física entre insumos y el producto que generan al combinarse y la parte económica que son los costos de los factores de producción. En el corto plazo se tiene una familia de costos totales, de costos medios o promedio y un costo marginal que se definirán enseguida:

El costo total (CT) de una empresa es el costo de *todos* los recursos productivos que emplea. Este costo se divide en costo *fijo* y costo *variable*.

El costo fijo (CF) es el costo de los insumos *fijos* de la empresa. Para un empresario en particular, el costo fijo incluye el alquiler del capital y el *beneficio normal*, que es el costo de oportunidad de su empresa. En virtud de que la cantidad de insumos fijos no cambia en la medida que aumenta la producción, el costo fijo tampoco lo hace.

El costo variable (CV) es el costo de los recursos variables de la empresa. Para un empresario agrícola en particular, el fertilizante puede ser el insumo variable, por lo que el costo variable está integrado por el costo de este insumo, el cual se obtiene al multiplicar el de este recurso, P_x , por la cantidad de éste, X , $CV = P_x$

X. El costo variable es una función de la producción, por lo tanto, cambia junto con ésta.

El costo total es la suma del costo fijo y del costo variable, esto es: $CT = CF + CV$.

El costo fijo medio ($CFMe = CF / Y$) mide los costos fijos por unidad de producto y disminuye a medida que aumenta la producción.

Costo variable medio ($CVMe = CV / Y$) mide los costos variables por unidad de producto y por lo regular aumentan junto con la producción.

Costo medio ($CMe = CFMe + CVMe$) mide el costo por unidad de producto, en virtud que combina los efectos de los $CFMe$ y de los $CVMe$ la curva que los representa puede ser en forma de U.

El costo marginal (CMg) de una empresa es el incremento en el costo total que resulta del aumento de una unidad en la producción, mide la variación en los costos cuando cambia la producción. Se calcula como el incremento del costo total dividido entre el aumento de la producción: De manera aproximada, con información discreta, $CMg = \frac{\Delta CT}{\Delta Y}$ y de forma exacta, con información continua en un punto determinado de la función de costo total, $CMg = \frac{dCT}{dY}$ (Varían, 1999 & Parkin et al., 2011).

2.3 La maximización de la ganancia o beneficio a corto plazo

Una vez que se realiza el proceso de producción, donde los insumos fijos y variables se combinan y se transforman en producto a través del proceso técnico, el empresario obtiene el producto o el bien en cuestión, el cual vende en el mercado de dicho bien al precio vigente, obteniendo así el ingreso total por la venta de su producto, $IT = Py Y$. Pero para producir este bien el empresario o productor incurre en los costos de producción o costos totales, los cuales están integrados por los costos de los insumos fijos, los que generan los costos fijos más los costos de los insumos variables, que representan los costos variables. Se asume que el empresario opera en un mercado de competencia perfecta, donde no puede influir en el precio de los insumos que adquiere ni en el precio del producto que vende, debido a las pequeñas cantidades de éstos que

intercambia. Algebraicamente: $CT = CF + CV$. Pero el empresario busca optimizar el uso de sus recursos para lograr su principal objetivo que es la máxima ganancia o beneficio económico: $\pi = IT - CT$. Desde el punto de vista económico esto se obtiene derivando la función de ganancia con respecto a la producción (Y), e igualándola a cero. De esa manera se obtiene que el ingreso marginal,

$IMg = \frac{dIT}{dY}$, es igual al costo marginal, $CMg = \frac{dCT}{dY}$, que es la condición económica, necesaria, de la maximización de la ganancia, la suficiente sería que, la segunda sea negativa (Varían, 1999).

$$\pi = IT - CT$$

$$\frac{d\pi}{dY} = \frac{dIT}{dY} - \frac{dCT}{dY} = 0$$

$$\frac{dIT}{dY} = \frac{dCT}{dY}$$

$$IMg = CMg$$

Para realizar el estudio de la producción técnica de un cultivo se debe examinar, en principio, la relación que existe entre los nutrientes y el rendimiento (Martínez, 1971; Jauregui y Sain, 1992 y Portillo, 2015). Esta relación puede representarse convenientemente en forma matemática. Si se denota las dosis de los nutrientes (insumos) N, P, K, \dots , aplicados al suelo por unidad de superficie, por las letras n, p, k, \dots , y por Y al rendimiento del cultivo por unidad de superficie, se puede representar:

$$Y = f(n, p, k, \dots) \quad (2.2)$$

donde f puede ser una función cúbica, cuadrática, exponencial, etc. Se denotará a la relación (2.2) "función de producción". Desde el punto de vista económico la aplicación de N, P, K, \dots , tiene un costo que está determinado por la relación:

$$CT = g(n, p, k, \dots) \quad (2.3)$$

donde CT es el costo total de aplicación de los nutrientes por unidad de superficie, el cual es una función de las dosis de n, p, k, \dots ; se denotará a la

relación (2.3) “función de costo total”. Una de las funciones de mayor uso en la práctica, es una función de la forma:

$$CT = CF + P_N n + P_P p + P_K k + \dots, \quad (2.4)$$

donde CF representa los costos fijos de aplicación; y los símbolos P_N , P_P , P_K , ..., los precios unitarios de mercado de los nutrientes N, P, K, ..., respectivamente. El ingreso total del productor viene dado por $P_Y Y$, donde P_Y es el precio unitario de mercado del producto. Definiendo el óptimo económico como la cantidad de nutriente que genera el rendimiento o la producción de máxima ganancia o beneficio económico, dicha cantidad de insumo se obtiene, igualando el valor del producto marginal del insumo ($VPM_{gI} = PM_{gI} * P_Y Y$) al precio del insumo $P_I = P_N$, P_P , P_K , ..., lo cual es equivalente a igualar el producto marginal del insumo (recurso), ($PM_{gI} = \frac{\partial Y}{\partial X}$), a la relación de precios del nutriente con el precio del producto ($\frac{P_I}{P_Y}$), como se plantea en la ecuación (2.5). Matemáticamente, el problema se circunscribe a encontrar el máximo del producto $P_Y Y$ sujeto a la restricción (2.4) suponiendo una función de costo lineal. Formando la siguiente ecuación o función de Lagrange:

$$L = P_Y Y + \lambda (CT - CF - P_N n - P_P p - P_K k - \dots)$$

Derivando L sucesivamente con respecto a n , p , k , ..., e igualando las correspondientes igualdades a la relación de precio insumo/producto, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial n} &= \frac{P_N}{P_Y} \\ \frac{\partial L}{\partial p} &= \frac{P_P}{P_Y} \\ \frac{\partial L}{\partial k} &= \frac{P_K}{P_Y} \end{aligned} \quad (2.5)$$

El sistema de ecuaciones (2.5) se resuelve simultáneamente. Los valores que se obtengan de n , p , k , ..., deben satisfacer al sistema y son las dosis óptimas de los recursos.

Cuando se consideran los CF de la aplicación de los fertilizantes, puede suceder que el valor del incremento en el rendimiento no sea suficiente para solventar los CT de aplicación. Las aplicaciones de dosis bajas pueden ser insuficientes para pagar los CF, aun cuando cubran los costos variables $P_N n + P_P p + P_K k + \dots$, de la ecuación (2.4). Del planteamiento precedente se deduce que debe existir un valor mínimo de n, p, k, \dots , cuyas aplicaciones inferiores a estas dosis mínimas producirán pérdidas en lugar de la ganancia deseada (Pesek y Heady, 1958, citados por Martínez, 1971), estos investigadores sugieren que se consideren como dosis mínimas de aplicación las cantidades de insumos que hacen máximas las ganancias netas por unidad monetaria. Considerando que la ganancia total es la diferencia: $\pi = P_Y Y - CT$; de donde la ganancia neta por unidad monetaria que se gasta se denota como G y se define como sigue: $G = (P_Y Y - CT) / CT$. Las dosis de N, P, K, \dots , para las cuales G es un máximo se calculan resolviendo simultáneamente el sistema:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial n} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial p} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial k} &= 0 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Nótese que CT en el sistema anterior no es una constante, si no que CT es una función de las dosis n, p, k, \dots . Las cantidades que se obtienen al resolver el sistema (2.6), se deben usar en la práctica de la forma siguiente: cuando un agricultor no tiene los recursos o el suficiente fertilizante para abonar toda su parcela, a las dosis mínimas recomendadas, deberá aplicar su fertilizante a estas cantidades mínimas hasta que se le termine y el resto de la superficie se dejará sin fertilizar (Martínez, 1971; Portillo, 2015), toda vez que otra combinación distinta de dosis y superficie reducirá las ganancias para una cantidad determinada de fertilizante.

Según algunos investigadores (Martínez, 1971; Jauregui y Sain, 1992 & Portillo, 2015) la respuesta clásica de los cultivos a las adiciones sucesivas de fertilizantes sigue la Ley de Rendimientos (“Marginales”) Decrecientes. “... A

dosis bajas de los nutrientes, incrementos en las dosis producen incrementos mayores en los rendimientos, e inversamente a dosis altas de los nutrientes, incrementos en las dosis producen incrementos menores en los rendimientos” (Martínez, 1971, p. 20). De lo anterior se deduce que en la práctica se utilizan funciones matemáticas que representan empíricamente la ley de los rendimientos decrecientes. Las funciones matemáticas utilizadas con mayor frecuencia son: funciones del tipo exponencial, polinomios de tercer grado y de segundo grado, entre otras (Martínez, 1971; Beattie y Taylor, 1993 & Nicholson, 2002). Los polinomios de segundo grado permiten una representación muy razonable de las respuestas de un cultivo a las aplicaciones de nutrientes. Para el caso de 1 y 2 dos insumos se tiene las ecuaciones siguientes:

$$N: Y = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 n^2 \quad (2.7)$$

$$N, P: Y = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 p + \beta_3 n^2 + \beta_4 p^2 + \beta_5 np \quad (2.8)$$

El sistema de ecuaciones (2.7) se reduce sencillamente a la siguiente ecuación para el caso de un nutriente o de una fórmula balanceada de fertilizante (F):

$$\beta_1 + 2\beta_2 n = \frac{P_N}{P_Y}, \text{ de donde}$$

$$n^* = \frac{1}{2\beta_2} \left(\frac{P_N}{P_Y} - \beta_1 \right) \quad (2.9)$$

donde n^* o f^* es la dosis óptima de N o de F, respectivamente.

2.4 Revisión de algunos artículos científicos

Swanson, Taylor and Welch (1973) investigaron los niveles económicamente óptimos de fertilizante nitrogenado para maíz de 1967 a 1971 en ocho lugares diferentes de Illinois. Estimaron funciones de respuesta para cada año en cada ubicación que relacionan el rendimiento del maíz con el fertilizante nitrogenado. Las tasas económicamente óptimas en condiciones de poder pronosticar la temporada y con las relaciones de precios promedio de ese periodo variaron de 100 libras por acre en Brownstown a 290 libras por acre en DeKalb. Se utilizaron tres modelos de decisión basados en la teoría de juegos para estimar las tasas óptimas para cada ubicación en condiciones en las que el

productor no puede predecir la temporada. La tasa óptima indicada fue de 200 libras o más.

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) investigó en 1983 la Respuesta de Maíz a N y P en Veracruz, México y por simplicidad solamente ajustó una función cuadrática (polinomio de segundo grado), en la cual además de considerar los niveles de fertilización como variables explicativas, incorporó otra variable de sitio que es el tipo de suelo ($L = 1$ para ladera y $L = 0$ para planicie) con ello mejoró sustancialmente la explicación del modelo y considerando los precios de mercado de los nutrientes y el precio de maíz, calculó los óptimos económicos para $N^* = 109 \text{ kg ha}^{-1}$ y $P^* = 71 \text{ kg ha}^{-1}$, citado por (Jauregui & Sain, 1992). Stone, Camp, Sadler, Evans and Millen (2010) investigaron la respuesta del rendimiento de maíz al fertilizante nitrógeno y al riego en la Llanura Costera Sureste, la respuesta general del rendimiento para los tratamientos de riego combinado con N fue cuadrática en 1999 y 2000, alcanzando un límite superior potencial en la producción y lineal en 2001, mostrando mayores rendimientos con aplicaciones adicionales de N. Para el tratamiento de temporal, la respuesta del rendimiento al fertilizante N fue lineal en los tres años.

Aguilar-Carpio, C. et al. (2015) analizaron el rendimiento y rentabilidad de maíz en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno en Iguala, Guerrero, México en 2011. Encontraron que la materia seca (MS) y el rendimiento en grano (RG) más alto se logró con la combinación de H-562, biofertilizante y 160 kg N ha^{-1} (30000 y 9243 kg ha^{-1} , respectivamente) y el más bajo correspondió al tratamiento VS-535, con biofertilizante (Bio) y sin nitrógeno (17030 y 3760 kg ha^{-1} , respectivamente). El mayor ingreso neto se obtuvo con H-562 y 160 kg N ha^{-1} independientemente del uso de Bio. El empleo de Bio más 80 kg N ha^{-1} con H-562 generó la mayor ganancia por peso invertido (GPI), debido a que por cada peso invertido, se recuperaron \$ 4.33.

Velázquez y Rendón (2012) obtuvieron el híbrido experimental H-155 de maíz de grano blanco para los Valles Altos y Zona de Transición de México en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), con elevados rendimientos y atractivo para productores del estado de Puebla

que han acudido los Días de Presentación de Experimentos en el Campo Agrícola Experimental de la UACH y ya lo están cultivando en sus parcelas. Según Martínez-Gutiérrez, A. et al. (2018) encontraron que en los últimos años, se han realizado trabajos constantes en el programa de mejoramiento genético del INIFAP, para incrementar el rendimiento de grano de maíz con la liberación de nuevas variedades mejoradas (Espinosa et al., 2003; Espinosa et al., 2008b; Espinosa et al., 2010; Espinosa et al., 2012; Tadeo et al., 2016a y Espinosa et al., 2018), al mismo tiempo se efectuaron investigaciones sobre adopción de las mejores prácticas de la fertilización química y foliar y manejo en el cultivo de maíz en Valles Altos (Zamudio et al., 2015). Estas investigaciones serían de mayor utilidad para los productores de maíz que adoptan dichas semillas si se complementaran con el análisis económico para determinar densidades óptimas de semilla y dosis óptimas económicas de fertilizante para que los agricultores eleven al máximo sus ganancias. Martínez-Gutiérrez, A. et al. (2018) concluyeron que los híbridos evaluados presentaron rendimientos mayores al testigo comercial H- 50 (11.5 t ha^{-1}) y al promedio regional, lo que puede representar una opción para las empresas productoras de semillas y para los agricultores al contar con semillas mejoradas con mayores ventajas agronómicas y económicas para la producción de granos en Valles Altos de México. De acuerdo con Zamudio et al., (2015) obtuvieron en Valles Altos del Estado de México bajo clima favorable altos rendimientos de grano de maíz alcanzando un promedio general de 12.07 t ha^{-1} . Los elevados rendimientos los obtuvieron con el uso de nuevos híbridos y la adopción de las mejores prácticas agrícolas, como la fertilización al suelo y la nutrición foliar.

“*El valor está en la semilla*” así es como Brambila (2006) describe la importancia de la semilla de un cultivo en particular en su libro: *En el umbral de una agricultura nueva*. Así mismo señala que con el uso de la genómica, la proteómica y la biotecnología³ en la agricultura y la ganadería se espera que en

³ Brambila *Op. cit.* pp., 218-226. La genómica es una familia de tecnologías que traducen la información acerca de los genes en conocimiento, (de) cuál gen está presente, qué hace y cómo sus productos que son por lo general proteínas contribuyen a las propiedades y conducta de las células. Biotecnología: Del griego bioc-vida, elemento compositivo que antepuesto o propuesto a otro, expresa la idea de la vida. Biotecnología, es el conjunto de conocimientos relativos a la vida. La Universidad Complutense de Madrid

el futuro se produzcan bienes y servicios tales como: Cultivos que generen más nutrientes, con mayores rendimientos empleando menores cantidades de: tierra, agua, fertilizantes y químicos en general. Plantas que produzcan poliéster y almidón adecuado para obtener bioplásticos. Producir mejores alimentos y productos que no son alimentos, como plantas y animales que puedan ayudar a curar enfermedades específicas. En el caso del maíz, hay evidencias de que combate el herpes, la hepatitis B y C y la diarrea (Fumento, 2003, citado por Brambila, 2006).

Algunos investigadores del CIMMYT le atribuyen al maíz azul propiedades nutricionales para la prevención de algunas enfermedades como el cáncer de riñón, colon y mama, asimismo reportan investigaciones como antioxidante dado el contenido de antocianinas y como antiinflamatorio. Además, señalan un incremento en los derivados del maíz azul en los Estados Unidos de Norteamérica en forma de Blue chips, *Corn flakes*, *Taco shells* y en bebidas como *Purple Corn* y *Vidafenol*. Mientras que en México están las Salmas de maíz azul horneadas y la harina azul de Maseca (Molnar et al., 2020). Blare y Donovan (2019) encontraron en un estudio en Texcoco, Estado de México, para probar las preferencias de los consumidores y su disposición a pagar por tortillas de maíz azul que las mujeres estaban dispuestas a pagar un 33% más por las tortillas de maíz azul, mientras que los hombres solo un 19% más. Por cada año adicional de educación, un consumidor estaba dispuesto a pagar un 1% más por las tortillas de maíz azul. Casualmente, el ingreso de una persona no tuvo ningún efecto sobre su disposición a pagar por más tortillas de maíz azul. Muchas personas entrevistadas expresaron su preferencia por el maíz azul, pero comentaron que no siempre pueden encontrarlo en los mercados locales.

Literatura citada

Aguilar-Carpio, C., Escalante-Estrada, J. A. S., Aguilar-Mariscal, I., Mejía-Contreras, J. A., Conde-Martínez, V. F., & Trinidad-Santos, A. (2015). Rendimiento y rentabilidad de maíz en función del genotipo, biofertilizante y

define proteómica así: es un área de la Biología cuyo objetivo es el estudio de los proteomas. Un proteoma es el conjunto de proteínas expresadas por un genoma, una célula o un tejido (Consulta 14/09/2020).

nitrógeno, en clima cálido. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18 (2015): 151 – 163 pp.

Beattie, B. R., & Taylor C. R. (1993). *The Economics of Production*. (Reprint edition). Malabar, Florida, EUA: Krieger Publishing Company.

Blare, T. & Donovan, J. (2019). Estudio para probar las preferencias de los consumidores y su disposición a pagar por tortillas de maíz azul. Consultado 18-10-2020 en <https://www.cimmyt.org/news/blue-maize-is-all-the-rage-but-are-consumers-willing-to-pay/>

Brambila, P., J. J. (2006). En el umbral de una agricultura nueva. Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México.

Dornbusch, R. & Fischer, S. (1994). *Macroeconomía*. (Sexta edición). Madrid, España: Mc Grow-Hill.

Jauregui, M.A., & G.E. Sain. (1992). Continuous Economic Analysis of Crop Response to Fertilizer in On-Farm Research. CIMMYT Economics Paper No.3. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Cardoso-Galvão, J. C., Vázquez-Carrillo, G., & Turrent-Fernández, A. (2018). Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, volumen (9), número 7. 28 de septiembre - 11 de noviembre, 2018. México.

Martínez, G. A. (1971). *Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos*. CP. Chapingo, Méx.

Martínez, G. A. (1982). *Métodos econométricos*. CP. Chapingo, México.

Mas-Colell, A., Whinston, M. D. & Green, J. R. (1995). *Microeconomic Theory*. New York, USA: Oxford University Press.

Molnar, T., Chepetla, D., Rodríguez, E., Espinoza, J. M., Tellez, G. & Palacios, N. (2020). Desarrollo de híbridos de alto potencial de maíz azul para México. Consultado 18-10-2020 en https://www.youtube.com/watch?v=sChURNjoaTE&feature=youtu.be&utm_sour

ce=Integrated+Development+Program&utm_campaign=995d4114dcEnIACe_B
oletin_448&utm_medium=email&utm_term=0_8232f74550995d4114dc2073138
85&ab_channel=ACCIMMYT

Nicholson, W. (2002). *Microeconomics Theory: Basic principles and extensions*. (Eighth Edition). Thomson Learning, Inc, USA.

Parkin, M., Esquivel, G. & Ávalos, M. (2006). *Microeconomía*. Versión para América Latina. (7ª edición). Naucalpan, Estado de México, México. ADDISON-WESLEY, INC.

Portillo, V. Marcos. (2015). *La Función de Producción Cúbica, su aplicación en la agricultura*. UACH, México.

Stone, K. C., Camp, C. R., Sadler, E. J., Evans, D. E., & Millen, J. A. (2010). Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer and Irrigation in the Southeastern Coastal Plain. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN 0883-8542. Vol. 26(3): 429-438.

Swanson, E.R., Taylor, C.R., & Welch, L. F. (1973). Economically Optimal levels of Nitrogen Fertilizer for Corn: an Analysis Based on Experimental Data, 1966-1971. *Illinois Agricultural Economics*, Vol. (13), No. 2 (julio de 1973): 16-25. doi: 10.2307 / 1348945

Varian, H. R., (1999). *Microeconomía intermedia. Un enfoque actual*. (Quinta edición). Barcelona, España: Antoni Bosch, editor.

Velázquez, C. G. A. & Rendón, G. A., 2012. H-155, híbrido experimental de maíz de grano blanco para los Valles Altos y Zona de Transición de México. Memoria de Día de Campo CEVAMEX 2012. Campo Experimental Valle de México. CIRCE-INIFAP.

Zamudio, G., B., Félix, R., A., Martínez, G., A., Cardoso, G., J. C., Espinosa, C., A., & Tadeo, R., M. (2015). Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, volumen (9), número 6. 14 de agosto - 27 de septiembre, 2018.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los tres experimentos que se realizaron de 2017 a 2019 con las semillas de maíz híbrido, las variedades mejoradas de maíz blanco y azul (*Zea mays* L.) y las distintas dosis de fertilización hasta la toma de datos en la cosecha.

3.1 El experimento de maíz de 2017

El día 27 de mayo de 2017 se sembró con sembradora mecánica en el Campo Agrícola Experimental “El Ranchito” de la Universidad Autónoma Chapingo el primer experimento de una hectárea con maíz blanco híbrido subtropical H-377. El lote se ubica geográficamente entre los paralelos 19°24´ y 19°33´ de latitud norte; los meridianos 98°38´ y 99°02´ de longitud oeste.



Figura 1. Ubicación de la parcela X-11 en Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo.

Con base en el argumento de que “*el valor está en la semilla*” (Brambila, 2006) y en los maíces que han mejorado investigadores del INIFAP y de la UACH se eligieron las semillas a utilizar en los experimentos y que podrán adoptar los productores de Valles Altos de México.

3.1.1 La semilla de maíz blanco H-377

Este híbrido subtropical fue desarrollado por investigadores del INIFAP. Su grano es mediano color blanco. Se recomienda para la siembra en la zona Centro Occidente de México, para altitudes de 600 a 2000 msnm, aunque también se ha probado a 2200 msnm, es adecuado para la siembra de riego y buen temporal. Es de porte intermedio de 2.60 m de altura de planta, con ciclo de vida largo: 150 días de siembra a cosecha. Se recomienda sembrarlo a densidades de 70 a 85 mil plantas por hectárea para grano y elote. Es tolerante a mancha de asfalto.

3.1.2 Diseño de tratamientos

El primer experimento se realizó con un fin exploratorio, para determinar la respuesta en rendimiento de grano del cultivo de maíz H-377 a la fórmula de fertilización con los contenidos de nutrientes que se mencionan en los Cuadros 1 y 2. El cultivo se desarrolló bajo condiciones de temporal con riegos de auxilio cuando se presentó sequía. Los tratamientos se dispusieron en bloques continuos de ocho surcos cada uno, los cuales consistieron en 8 tratamientos de fertilización incluyendo un testigo absoluto (ver Cuadro 2), con dos repeticiones. Cada lote o unidad experimental midió 6.4 m de ancho por 95 m de largo dando una superficie de 608 m² y una densidad de siembra de 4,560 plantas, equivalente a 75,000 plantas por hectárea.

Cuadro 1. Porcentaje de nutrientes en la fórmula de fertilizante de la primera y segunda aplicación.

Nutrientes	1ª aplicación (%)	2ª aplicación (%)
Nitrógeno total (N)	21.00	27.0
N – Nítrico	7.00	13.7
N – Amoniacal	14.00	13.3
Fósforo (P ₂ O ₅)	17.00	
Potasio (K ₂ O)	3.00	
Azufre (SO ₄)	12.00	
Magnesio (MgO)	0.40	4.0
Zinc	0.18	

Granulometría (ISO)	85.00 2-4 mm	90.0
Densidad a granel (suelto)	1.04 kg l ⁻¹	1.1 kg l ⁻¹
Color – Gris:	Plomo	Claro

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa YaraMila®.

Como se puede observar en el contenido nutricional de esta fórmula comercial YaraMila® de fertilizante, aparentemente contiene la mayoría de los nutrientes que requiere el cultivo de maíz para un óptimo desarrollo y para lograr un alto rendimiento de grano, dadas unas óptimas condiciones de semilla, clima, suelo y sobre todo de buenas prácticas agrícolas. Sin embargo, hay que reconocer que no se hizo un análisis de suelo previo a la siembra para conocer el contenido nutrimental de éste, detectar las deficiencias y los excesos de algunos nutrientes, para corregirlas y elaborar una fórmula balanceada que respondiera a las necesidades del cultivo para garantizar un elevado rendimiento.

Cuadro 2. Tratamientos, primera aplicación (YaraMila STAR) y segunda (YaraBela NITROMAG) de fertilizante en kg/ha y contenidos de N, P, K, S, Mn, y Zn en kg/ha.

T	Primera aplicación	Segunda aplicación	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	S (SO ₄)	Mn (MgO)	Zn
T0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	70	42	26.04	11.9	2.1	8.4	1.96	0.126
T2	100	85	43.95	17.0	3.0	12.0	3.80	0.180
T3	130	128	61.86	22.1	3.9	15.6	5.64	0.234
T4	160	171	79.77	27.2	4.8	19.2	7.48	0.288
T5	190	214	97.68	32.3	5.7	22.8	9.32	0.342
T6	220	257	115.59	37.4	6.6	26.4	11.16	0.396
T7	250	300	133.50	42.5	7.5	30.0	13.00	0.450

²T = Tratamientos desde T0 hasta T7.

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa YaraMila®.

3.1.3 La cosecha

El día 20 de enero de 2018 después de 238 días se cosecharon cuatro muestras de 20 m de cada tratamiento, este proceso se repitió, para obtener mejor información, el 9 de marzo de 2018, a los 286 días después de la siembra. Por cada tratamiento se colectaron de manera aleatoria veinte mazorcas de plantas diferentes, en competencia completa -cada planta con plantas del mismo cultivo a su alrededor-; que se desgranaron, se pesaron y se obtuvieron las variables

respuesta, las cuales fueron peso de la mazorca, peso del grano y rendimiento de grano por hectárea.

3.2 El experimento de maíz de 2018

Los días 5 y 6 de mayo de 2018 se sembró a mano el segundo experimento de maíz blanco híbrido H-155, maíz blanco variedad Estrella y maíz azul variedad Celeste en la Tabla de San Juan del Campo Agrícola Experimental “El Ranchito” de la Universidad Autónoma Chapingo. El lote se ubica geográficamente entre los paralelos 19°24´ y 19°33´ de latitud norte; los meridianos 98°38´ y 99°02´ de longitud oeste.



Figura 2. Parcela Campo San Juan Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.2.1 Las variedades e híbrido de maíz

La semilla de maíz crema variedad Estrella

Esta variedad mejorada es de polinización libre obtenida por el Dr. Rafael Ortega Paczka, Profesor-Investigador de la UACH de la cruce de un maíz criollo colectado en el municipio de Chalco, Estado de México y un híbrido comercial, con selección en planta y mazorca por diez generaciones. Su grano es mediano

color crema. Se recomienda para la siembra en los Valles Altos Centrales ubicados entre 2,100 a 2,600 msnm en los estados de Puebla, México y Tlaxcala. Adecuada para siembra de riego, punta de riego y siembra de humedad residual. Porte intermedio de 2.5 m de altura de planta. Ciclo de vida largo de 150 días de siembra a cosecha. Se recomienda sembrar 50,000 mil plantas para grano y 60,000 o un poco más para silo. La fertilización recomendada es: 1. Aplicación de micorrizas en la siembra. 2. Primera aplicación de fertilizante en banda durante la escarda (primera labor) a una dosis de 100 kg de urea y 50 kg de DAP por hectárea. 3. Segunda aplicación de fertilizante en el aporque con una mezcla de 200 kg de urea y 100 kg de DAP. Así como aplicación de foliares (micronutrientes principalmente) en etapas tempranas del cultivo.

La semilla de maíz azul variedad Celeste

Esta variedad de color morado también es de polinización libre y la obtuvo el Dr. Paczka de la retrocruza de maíz criollo del municipio de Chalco y un híbrido comercial; es decir, es $\frac{3}{4}$ criolla. Recomendada para cultivarse en regiones de los Valles Altos Centrales de México. Porte intermedio, 2.50 m de altura de la planta y 1.40 m a la mazorca. Ciclo de 140 días de la siembra a la cosecha. Fertilización idéntica a la Estrella. Se decidió emplear esta variedad por las bondades que le atribuyen sobre la salud y la alimentación los investigadores del CIMMYT (Molnar & Palacios, 2020) y (Blare & Donovan, 2019).

La semilla de maíz blanco H-155

Este híbrido fue obtenido por (Velázquez, C. G. A. & Rendón, G. A., 2012) del Campo Experimental Valle México (CEVAMEX) del INIFAP. Es un híbrido trilineal de ciclo tardío con adaptación a siembras de riego en la Zona de transición Bajío Valles Altos (1900 a 2100 msnm). Este cultivar se caracteriza por tener una altura de planta promedio de 2.45 m y de 1.44 m en altura de mazorca. La cual es cónica con grano de color blanco-cremoso con 93 días a la floración masculina y femenina. Con un rendimiento esperado de casi 13 toneladas por hectárea.

3.2.2 Diseño de tratamientos

Se utilizó un diseño de tratamientos trifactorial 3x5. El primer factor consistió en el híbrido de maíz blanco (H-155), la variedad Estrella de maíz crema y la

variedad Celeste de maíz azul. El segundo factor fue de ocho dosis de fertilización que se elaboraron con la marca comercial YaraBela® NITROMAG®, cuyo contenido de N y Mg fue de 27 y 4 por ciento, respectivamente (ver Cuadro 3). Cabe mencionar que por error se aplicó el doble de los tratamientos planeados y consecuentemente de los tratamientos T3 al T7 se aplicaron cantidades en exceso que intoxicaron a las plantas de maíz y muchas de ellas se secaron. Lo cual resultó en una relación negativa entre las aplicaciones de fertilizante y el número de plantas por lote y repercutió también de manera negativa en el rendimiento de grano. El cultivo se desarrolló bajo condiciones de temporal con un riego de auxilio al inicio para que naciera la semilla. Los tratamientos se dispusieron en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones cada una. Cada lote o unidad experimental midió 3.2 m de ancho por 5.5 m de largo dando una superficie de 17.6 m² y una densidad de siembra de 110 plantas, equivalente a 62,500 plantas por hectárea.

Cuadro 3. Tratamientos, primera y segunda aplicación de fertilizante (YaraBela NITROMAG) en kg/ha y contenidos de N y Mg en kg/ha.

T	N 1 ^a aplicación	N 2 ^a aplicación	N total	MgO 1 ^a aplicación	MgO 2 ^a aplicación	MgO total
T0	0	0	0	0	0	0
T1	67	33	100	5	2	7
T2	133	67	200	10	5	15
T3	200	100	300	15	7	22
T4	267	133	400	20	10	30
T5	333	167	500	25	12	37
T6	400	200	600	30	15	45
T7	467	233	700	35	17	52

²T = Tratamientos desde T0 hasta T7.

Fuente: Elaboración propia con información de la empresa YaraMila®.

3.2.3 La cosecha

Durante los días del 21 al 24 de diciembre de 2018 después de 199 días desde la siembra, se realizó la cosecha y se determinaron las variables respuesta. Por cada tratamiento se colectaron todas las mazorcas de las plantas internas de

cada lote para evitar el efecto orilla, que fueron las que se procesaron en una bodega del “Ranchito”. Se depositaron en bolsas de polietileno previamente etiquetadas y de ahí se seleccionaron cinco mazorcas que posteriormente se desgranaron, se pesó el grano, el olote y se midió la humedad en una balanza analítica. Las variables respuesta que se evaluaron fueron, número de plantas cosechadas, peso seco de mazorca, peso del grano de maíz, peso seco del olote y rendimiento de maíz por hectárea.

3.3 El experimento de maíz de 2019

El experimento se estableció el 27 de mayo del 2019. Se utilizaron dos variedades de maíz (Estrella y Celeste) y dos híbridos de maíz blanco comerciales H-48 y ST10W, a las cuales se les aplicó diferentes dosis de fertilización con la finalidad de evaluar posteriormente el rendimiento de grano. El experimento se desarrolló en el Campo Agrícola Experimental “El Ranchito”, en el lote X-11, perteneciente a la UACH. El lote se ubica geográficamente entre los paralelos 19°24' y 19°33' de latitud norte; los meridianos 98°38' y 99°02' de longitud oeste.

3.3.1 Análisis de suelo y diseño de tratamientos

Se realizó un muestreo de suelo previo al establecimiento del cultivo. Se recolectaron 15 submuestras de manera aleatoria de tal manera que éstas fueran representativas del terreno, posteriormente se formó una muestra compuesta que fue enviada al laboratorio de análisis químico NUTRELAB para la determinación de su fertilidad, mediante los métodos establecidos en la NORMA Oficial Mexicana NOM-021- SEMARNAT-2000.

En el análisis de suelo se encontró bajo contenido de materia orgánica y de nitrógeno inorgánico (N), mientras que, cantidades en exceso de fósforo (P_2O_5) y de potasio (K_2O). En contenido de micronutrientes, hubo deficiencia de Cu; nivel bajo de Fe y Zn; medio de CaO; alto de Mn y exceso de Mg y de B. El CIC también fue bajo y medio el pH. Tomando en cuenta esta información y los requerimientos del cultivo de maíz para producir un rendimiento promedio esperado de 10 t ha^{-1} , se elaboró la fórmula balanceada de fertilizante (F) con los contenidos siguientes: 23% de N, 0% de P_2O_5 , 26.53% de K_2O , 17.73% de

CaO más la mezcla de micronutrientes antes mencionados. Se utilizó un diseño de tratamientos tetrafactorial 4x5. El primer factor consistió en dos variedades de maíz (Estrella y Celeste) y dos híbridos comerciales. El segundo factor en cinco dosis de fertilización (T0: Testigo absoluto; T1: Dosis del productor; T2:1/2 de la dosis óptima; T3: Dosis óptima y T4:1+1/2 de la dosis óptima. El T0 consistió en no aplicar ningún tipo de fertilizante al suelo o a la planta; el T1 fue dosis que se investigó con productores de la región (400 kg ha⁻¹ de F) y la dosis óptima se realizó con base en el análisis de suelo la cual fue de 1,200 kg ha⁻¹ (con 276N-0 P₂O₅-318K-213 CaO + micronutrientes) y sirvió de punto de referencia para los tratamientos T2 y T4.

Cuadro 4. Resultado del análisis de suelo y fórmula de fertilización.

Nutrientes	Contenido en mg kg ⁻¹	Clasificación nutrimental	Recomendaciones de fertilizante kg ha ⁻¹	Fórmula de fertilización kg ha ⁻¹			
				1400	600	1200	1800
Materia orgánica %	1.41%	Bajo	14,516.70	-	-	-	-
Nitrógeno inorgánico	14.00	Bajo	161.80	92	138	276	414
Fósforo (P ₂ O ₅)	49.59	Exceso	3.40	0	0	0	0
Potasio (K ₂ O)	293.74	Exceso	186.70	106	159	318	476
Calcio (CaO)	1,410.96	Medio	125.00	71	106	213	319
Magnesio (Mg)	631.90	Exceso	0.00	0	0	0	0
Hierro (Fe)	10.26	Bajo	2.18	0.56	1.08	2.18	3.27
Manganeso (Mn)	47.42	Alto	0.00	0	0	0	0
Zinc (Zn)	0.85	Bajo	5.30	1.59	2.65	5.30	7.95
Cobre (Cu)	0.50	Deficiente	3.40	1.02	1.70	3.40	5.10
Boro (B)	0.72	Exceso	1.14	0.34	0.57	1.14	1.71

CIC (me/100g)	12.00	Bajo	-	-	-	-	-
Azufrar (pH)	5.85	Medio	-	-	-	-	-

CIC= Capacidad de intercambio catiónico. me = miliequivalentes por 100g.

Fuente: Análisis de suelo realizado por el laboratorio NUTRELAB.

3.3.2 Fórmula de nutrición edáfica

La fórmula de fertilización se elaboró con base en el análisis de suelo y corresponde a la dosis óptima: Tratamiento T3; es decir, 1,200 kg ha⁻¹, la cual es proporcional a los tratamientos T2, 600 y T4, 1,800 kg ha⁻¹, respectivamente.

Cuadro 5. Dosis de fertilización óptima con base en el análisis de suelo.

Nutrimento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Fe	Mn	Zn	Cu	Bu
Fórmula	16.18	0.34	18.67	0.22	0.00	0.53	0.34	0.15

Fuente: Elaborado con información del análisis de suelo.

3.3.3 Variedades e híbridos de maíz

Cabe señalar que en el experimento de 2019 se volvieron a emplear las variedades de maíz crema Estrella y la de azul Celeste como en el experimento del año 2018.

La semilla de maíz blanco H-48

Es un maíz híbrido trilineal para Valles Altos de México, de ciclo intermedio; se adapta muy bien a condiciones de riego, punta de riego, buen temporal y humedad residual. La mazorca mide 16.8 cm, tiene 16 hileras con grano de color blanco, es tolerante al acame; zona de adaptación de 2000 a 2600 msnm. Porte de 2.45 a 2.73 m de altura de la planta y de 1.20 a 1.35 m a la mazorca. Su ciclo es de 150 a 155 días. Cobertura de mazorca buena. Tipo de grano semidentado. Densidad de plantas por hectárea de 60 a 75 mil. Tolerante a enfermedades foliares. Grano adecuado para la industria de la masa y la tortilla.

La semilla de maíz blanco ST10W

Este híbrido también se deriva de una cruce triple; está indicado para condiciones de riego y temporal en zonas de 2000 a 2600 msnm.; su ciclo es de

145 a 165 días. Porte de 2.30 a 2.70 m de altura de la planta y 1.20 a 1.35 m a la mazorca. Cobertura de mazorca buena. Tolerante al acame. Tipo de grano semidentado. Densidad de plantas por hectárea de 60 a 80 mil. Tolerante a enfermedades foliares. Uso para grano y forraje.

3.3.4 Diseño de tratamientos

El cultivo se desarrolló bajo condiciones de temporal con riegos de auxilio cada 15 días cuando se presentó sequía. Los tratamientos se dispusieron en un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro repeticiones cada una. Cada lote o unidad experimental midió 8.8 m de ancho por 20 m de largo dando una superficie de 176 m² y una densidad de siembra de 1,056 plantas, equivalente a 60,000 plantas por hectárea.

3.3.5 La cosecha

El día 6 de noviembre del 2019 después de 163 días desde la siembra, se realizó la cosecha y se determinaron las variables respuesta. Por cada tratamiento se colectaron de manera aleatoria cinco mazorcas de plantas diferentes, que fueron las que se procesaron en una bodega del “Ranchito”. Se depositaron en bolsas de polietileno previamente etiquetadas y se dejaron secar en condiciones ambientales durante 38 días hasta alcanzar una humedad promedio de 14 por ciento. Posteriormente, se desgranaron, se pesó el grano, el olote y se midió la humedad en una balanza analítica. Las variables respuesta que se evaluaron fueron peso seco de mazorca, peso del grano de maíz, peso seco del olote y rendimiento de maíz por hectárea.

4. LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO BLANCO EN MÉXICO, BASE DE LA ALIMENTACIÓN DE LOS MEXICANOS

Esta ponencia (comunicación) fue aceptada y presentada como Poster en el Congreso Iberoamericano de Estudios Rurales CIER XII, celebrado en Segovia, España, del 4 al 6 de julio de 2018.

Manuel Vargas^{a*}

^{a*}Institución: Universidad Autónoma Chapingo (Chapingo,
manuelvargas@correo.chapingo.mx)

4.1 Resumen

La producción de maíz se realiza en casi todas las regiones geográficas y zonas rurales de México en una gran diversidad de ambientes: húmedos, secos, fríos y calientes, desde el nivel del mar hasta los 3,500 msnm y con una diversidad de prácticas agrícolas y de usos de más de 80 etnias indígenas y de muchos pueblos mestizos que siembran 60 razas de maíces resultado de la selección de estos grupos indígenas por cerca de 8,000 años y más recientemente también por los grupos mestizos (CONABIO, 2011 y SAGARPA, 2012). Cada raza está adaptada a climas, suelos, plagas, manejo agronómico y a su realidad socioeconómica. Debido a ello, ocupó el 60 por ciento de la superficie sembrada de granos básicos en el año agrícola 2015. Se cultiva bajo diferentes sistemas de producción y con distintas tecnologías. Lo mismo la practican los campesinos para su subsistencia y de sus familias, que los pequeños productores y medianos que producen una parte para autoconsumo y otra para el mercado regional y los productores grandes (comerciales) que producen principalmente para la industria tortillera nacional y para elaborar alimentos para consumo animal, féculas y almidones, entre otros productos. El maíz es la base de la alimentación de la gran mayoría de los mexicanos, se consume a través de las múltiples formas de preparación y presentación en los hogares y en la agroindustria del país, como tortillas, tamales, atoles, almidón, aceite, botanas, frituras y cereales para el desayuno, entre otras presentaciones, por esa razón es considerado como un producto estratégico nacional y se debería reducir su dependencia del exterior. No obstante, y a pesar de ser México, el centro de origen a nivel mundial

de este grano, no se produce todo el maíz que la sociedad mexicana requiere para satisfacer sus necesidades alimenticias, debido a ello, se importó en 2016 cerca de la tercera parte del consumo aparente nacional -considerado como la producción, más las importaciones, menos las exportaciones-, aunque la mayor parte fue de maíz amarillo, materia prima necesaria para elaborar alimentos para consumo pecuario y para la agroindustria (Turrent et al., 2017).

Los objetivos de la presente investigación son elaborar indicadores numéricos para demostrar que el maíz grano blanco sigue siendo la base de la alimentación de los mexicanos y que, al menos en el mediano plazo, continuará cumpliendo esta función. La metodología implementada consiste principalmente, en la revisión de las estadísticas de fuentes secundarias para identificar los principales estados y regiones productoras y consumidoras de maíz en México. Otras variables de interés analizadas fueron la producción, el consumo, las importaciones y exportaciones. Se emplearon tasas de crecimiento anual efectivas para analizar el comportamiento y la proyección, a mediano plazo, de estas variables.

En los resultados se destaca la concentración del 80 por ciento de la producción en diez entidades federativas en 2016. La producción de maíz blanco creció a una tasa media anual de 2,5 por ciento durante el periodo de 1990 a 2016, incrementándose de 14,6 a 28,3 millones de toneladas en ese lapso. De continuar esta tasa, se espera que la producción se eleve de 29,0 millones de toneladas en 2017 a 32,1 en 2021. Las importaciones de maíz que realizó México de los Estados Unidos de Norteamérica son básicamente de grano amarillo y crecieron a una tasa promedio anual de 4,8 por ciento de 1990 a 2016, elevándose de poco más de 4 millones de toneladas a cerca de 14 millones en ese periodo. De continuar esta tendencia en el lustro de 2017 a 2021, la cantidad importada aumentará de 14,6 a 17,7 millones de toneladas. México ha realizado ventas marginales al exterior de grano blanco cuando tiene excedentes, obteniendo un récord en 2016 de 1,7 millones de toneladas por la buena cosecha que obtuvo. El consumo aparente de maíz blanco y amarillo en México (331.6 kg per cápita en 2016) pasó de 18,7 a 40,6 millones de toneladas de 1990 a 2016, respectivamente. Creciendo a una tasa promedio anual de 3 por ciento, este

consumo aumentaría de 41,8 millones de toneladas en 2017 a cerca de 47 millones en 2021.

México es autosuficiente en maíz grano blanco para consumo humano y lo seguirá siendo si aumenta la producción nacional. Las importaciones de maíz amarillo continuarán en aumento en el mediano plazo, a menos que el gobierno mexicano fomente sustancialmente, las áreas de reconversión productiva. El consumo aparente de maíz blanco y amarillo continuará con su tendencia ascendente en el mediano plazo, lo cual confirma que el maíz seguirá siendo la base de la alimentación de la gran mayoría de los mexicanos.

Palabras clave: maíz blanco, producción, consumo, territorio y rural.

4.2 Introducción

En la presente comunicación se ilustran algunos indicadores numéricos que muestran que la producción de maíz blanco, las importaciones de maíz amarillo, las exportaciones de maíz blanco y el consumo aparente de maíz blanco y amarillo seguirán una tendencia creciente en el mediano plazo (próximo lustro), lo cual obedece a que este grano es el principal cereal en la dieta de los mexicanos y la materia prima necesaria para elaborar alimentos pecuarios, que a la postre se transformarán en carne, leche y huevo, fuentes alimenticias de la población. Así como en otros subproductos para la agroindustria. La amplia gama de formas de producción de este cereal en el territorio nacional obedece a la demanda de este producto por la población mexicana y a la cultura de los pueblos indígenas asociada con la defensa de su identidad y del territorio que habitan.

4.3 Objetivos

Los objetivos que se persiguen en la presente investigación son: Elaborar indicadores numéricos para demostrar que el maíz grano blanco sigue siendo la base de la alimentación de los mexicanos y que, al menos en el mediano plazo, continuará cumpliendo esta función. Y que la amplia gama de formas de producción de este cereal a lo largo y a lo ancho del territorio nacional obedecen a la demanda de este producto para satisfacer las necesidades alimenticias de

la población mexicana y a la cultura de los pueblos indígenas asociada con la defensa de su identidad y del territorio que habitan.

4.4 Metodología

La metodología implementada en este trabajo consiste principalmente, en la revisión de las estadísticas de fuentes secundarias para identificar los principales estados y regiones productoras de maíz en México, así como de las principales ciudades y regiones consumidoras de dicho grano. Otras variables de interés a analizar son la producción, el consumo aparente, los precios del maíz, las importaciones y exportaciones. Se emplean las técnicas de regresión y de tasas de crecimiento anual efectivas para analizar el comportamiento y la proyección, a mediano plazo, de estas variables.

4.5 Resultados

Con relación a los principales resultados del estudio, se puede señalar que, en 2016 fueron diez estados los principales productores de maíz, que generaron cuatro quintas partes de la producción nacional de este grano. El maíz se cultiva bajo dos modalidades de régimen hídrico, que son de temporal y de riego. La primera modalidad se practica en casi todo el territorio nacional y la segunda en el noroeste y norte del país, en los estados de Sinaloa y de Chihuahua, primordialmente. Aún persiste un número elevado de productores pequeños, con una superficie sembrada menor a una hectárea, cuya producción es básicamente para autoconsumo, que siembra semilla nativa seleccionada por ellos mismos de generación en generación, la cual está adaptada a sus condiciones regionales de clima, de suelos, de manejo agronómicos y a su realidad socioeconómica. El consumo anual per cápita de maíz grano en 2016 ascendió a 331.6 kg, lo cual refleja que cada mexicano consume diariamente en promedio, cerca de un kg de productos derivados del maíz, lo cual confirma que sigue siendo la base de alimentación de la mayoría de la población mexicana (Turrent, et al., 2014 & Turrent, et al, 2017).

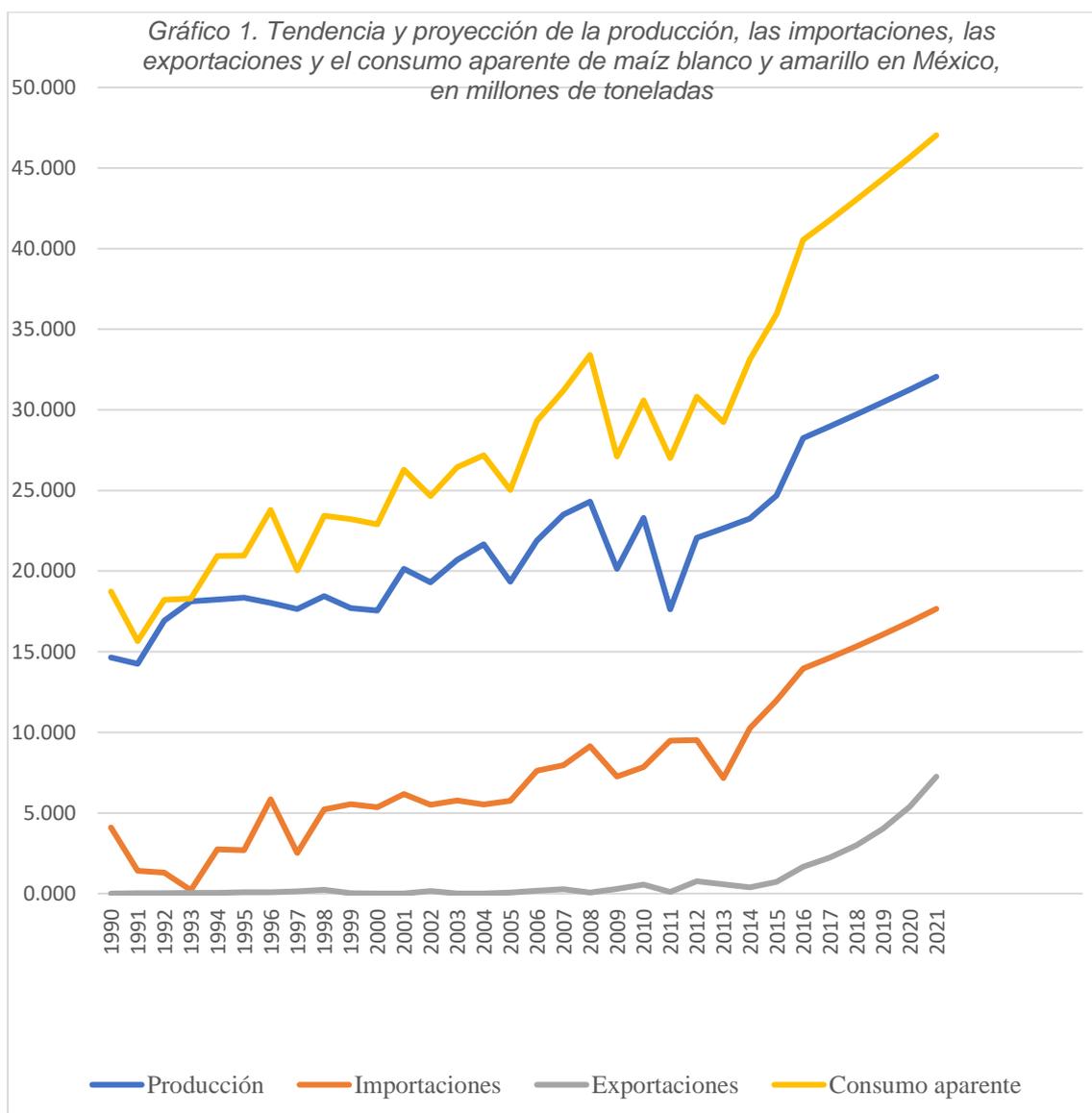
Como se observa en la Gráfica 1 la producción de maíz blanco creció a una tasa media anual de 2,5 por ciento durante el periodo de 1990 a 2016, lo cual permitió que pasara de un volumen de 14,6 a 28,3 millones de toneladas en ese lapso.

Dada la tasa de crecimiento observada, se espera que la producción se eleve de 29,0 millones de toneladas en 2017 a 32,1 en 2021. Este pronóstico es factible de lograrse si esta variable sigue la tendencia creciente que ha observado durante el periodo referido antes, y debido al efecto de los apoyos brindados al campo y de la política agrícola -Programa Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MasAgro)- seguida por el gobierno federal. La sociedad mexicana ha sido autosuficiente en la producción de maíz blanco para consumo humano, toda vez que, se ha empeñado en generar lo que se requiere para este propósito, a pesar de la disminución que se generó en este rubro en el año de 2009 por efecto de la crisis financiera de los Estados Unidos de Norteamérica, que encareció los insumos de importación como semilla mejorada de maíz blanco, fertilizantes químicos y algunos pesticidas.

Las importaciones de maíz que realizó México son principalmente de grano amarillo para la elaboración de alimentos pecuarios y para la agroindustria que lo usa como materia prima. Estas adquisiciones se obtuvieron fundamentalmente de los Estados Unidos de Norteamérica y crecieron a una tasa promedio anual de 4,8 por ciento de 1990 a 2016, elevándose de poco más de 4 millones de toneladas a cerca de 14 millones en ese lapso. De continuar la tendencia observada en esta variable en el lustro de 2017 a 2021, la cantidad importada aumentará de 14,6 a 17,7 millones de toneladas. No obstante que, las importaciones de este cereal fueron decrecientes en los años previos a la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, en los años de vigencia de este tratado las importaciones han seguido una marcada tendencia creciente, con excepción de ciertas disminuciones en los años 1997, 2009 y 2013, y a pesar de que hubo un periodo de quince años de apertura gradual en dicho cereal. Lo más probable es que estas compras de maíz amarillo al exterior continúen en el mediano plazo, toda vez que, las áreas de reconversión de este cultivo siguen siendo marginales y las necesidades son crecientes.

México no se ha caracterizado por ser un importante país exportador de maíz durante este periodo de análisis (1990-2016), ha realizado ventas marginales al exterior de grano blanco obteniendo un récord en el último año de este lapso de

1,7 millones de toneladas por la buena cosecha que obtuvo en ese año, no obstante que, la tasa crecimiento promedio anual que presenta, de casi 30 por ciento, es poco probable que las exportaciones aumenten de 2,2 millones de toneladas en 2017 a 7,3 millones de toneladas en 2021, toda vez que un buen temporal no se presenta cada ciclo como ocurrió en 2016. Pero de presentarse condiciones favorables para la producción de maíz blanco y con ello excedentes para exportación, de seguro encontrarían un mercado en el exterior, dada la calidad y el precio del grano.



Fuente: Elaboración con datos de FAOSTAT.

El consumo aparente -producción más importaciones menos exportaciones- de maíz blanco y amarillo en México pasó de 18,7 a 40,6 millones de toneladas de 1990 a 2016, respectivamente. Creciendo a una tasa promedio anual de 3 por ciento, de continuar esta tendencia creciente en esta variable el consumo aparente aumentará de 41,8 millones de toneladas en 2017 a cerca de 47 millones de toneladas en 2021. Esta cifra es muy probable de alcanzar, toda vez que, las necesidades de maíz blanco para consumo humano van en aumento y los requerimientos de maíz amarillo también son crecientes por el incremento en la población mexicana y en el ingreso -la renta- de ésta. El consumo anual per cápita de maíz grano en 2016 ascendió a 331.6 kg, lo cual refleja que cada mexicano consume diariamente en promedio, cerca de un kg de productos derivados del maíz.

4.6 Conclusiones

México es autosuficiente en maíz grano blanco para consumo humano y se espera que siga cubriendo esta necesidad con el aumento de la producción nacional de este cultivo en el próximo lustro.

Las importaciones de maíz amarillo continuarán en aumento en el mediano plazo, a menos que México incremente sustancialmente, las áreas de reconversión productiva de este cereal.

México seguirá exportando cantidades pequeñas de maíz blanco, en la medida que produzcan algunos excedentes de este producto.

El consumo aparente de maíz blanco y de maíz amarillo seguirá con su tendencia ascendente en el mediano plazo, toda vez que, tanto la demanda de maíz blanco para consumo de la población, como la de maíz amarillo para elaborar dietas pecuarias y para abastecer la agroindustria seguirá incrementándose.

Con base en lo anterior se puede deducir que, al menos en el mediano plazo, el maíz seguirá siendo la base de la alimentación de la población mexicana.

4.7 Bibliografía

CONABIO (2011). Razas de maíz en México. Consultado 28-04-2018 en <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>

<http://fao.org/faostat/es/#data>. Consultado 28-04-2018.

<http://masagro.mx/es/que-es-masagro/descripcion-general>. Consultado el día 27-03-2018.

SAGARPA (2012). Memoria Documental del Programa “Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional” 2010-2012: Autor.

Turrent, F. A.; Espinosa, C. A.; Cortés, F. J. I. y Mejía, A. H. (2014). Análisis de la estrategia MasAgro-maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(8):1531-1547.

Turrent, F. A., Cortés, F. J. I., Espinosa, C. A., Hernández R. E., Camas, G. R., Torres, Z. J.P. & Zambada, M. A. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8 (5), 1169-1185.

4.8 Anexo

Este resumen fue publicado en:

29062_ActasCongresolberoamericano_WEB.pdf

LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO BLANCO EN MÉXICO, BASE DE LA ALIMENTACIÓN DE LOS MEXICANOS

Manuel Vargas ^{a*}

^{a*}Institución: Universidad Autónoma Chapingo (Chapingo, manuelvargas@correo.chapingo.mx).

La producción de maíz se realiza en casi todas las regiones geográficas y zonas rurales de México en una gran diversidad de ambientes: húmedos, secos, fríos y calientes, desde el nivel del mar hasta los 3,500 msnm y con una diversidad de prácticas agrícolas y de usos de más de 80 etnias indígenas y de muchos pueblos mestizos que siembran 60 razas de maíces resultado de la selección de estos grupos indígenas por cerca de 10,000 años y más recientemente también por los grupos mestizos (CONABIO, 2011). Cada raza está adaptada a climas, suelos, plagas, manejo agronómico y a su realidad socioeconómica. Debido a ello, ocupó el 60 por ciento de la superficie sembrada de granos básicos en el año agrícola 2015. Se cultiva bajo diferentes sistemas de producción y con distintas tecnologías. Lo mismo la practican los campesinos para su subsistencia y de sus familias, que los pequeños productores y medianos que producen una parte para autoconsumo y otra para el mercado regional y los productores grandes (comerciales) que producen principalmente para la industria tortillera nacional y para elaborar alimentos para consumo animal, féculas y almidones, entre otros productos. El maíz es la base de la alimentación de la gran mayoría de los mexicanos, consumido a través de las múltiples formas de preparación y presentación en los hogares y en la agroindustria del país, como tortillas, tamales, atoles, almidón, aceite, botanas, frituras y cereales para el desayuno, entre otras presentaciones, por esa razón es considerado como un producto estratégico nacional y se debería reducir su dependencia del exterior. No obstante, y a pesar de ser Tehuacán, Puebla, México, el centro de origen y diversificación a nivel mundial de este grano, no se produce todo el maíz que la

sociedad mexicana requiere para satisfacer sus necesidades alimenticias, debido a ello, se importó en 2016 cerca de la tercera parte del consumo aparente nacional -considerado como la producción, más las importaciones, menos las exportaciones-, aunque la mayor parte fue de maíz amarillo, materia prima necesaria para elaborar alimentos para consumo pecuario y para la agroindustria.

Los objetivos de la presente investigación son elaborar indicadores numéricos para demostrar que el maíz grano blanco sigue siendo la base de la alimentación de los mexicanos y que, al menos en el mediano plazo, continuará cumpliendo esta función. La metodología implementada consiste principalmente, en la revisión de las estadísticas de fuentes secundarias para identificar los principales estados y regiones productoras y consumidoras de maíz en México. Otras variables de interés analizadas fueron la producción, el consumo, las importaciones y exportaciones. Se emplearon tasas de crecimiento anual efectivas para analizar el comportamiento y la proyección, a mediano plazo, de estas variables.

Como principales resultados se obtuvo que en 2016 fueron diez estados los principales productores de maíz, que generaron el 80 por ciento de la producción nacional. La producción de maíz blanco creció a una tasa media anual de 2,5 por ciento durante el periodo de 1990 a 2016, incrementándose de 14,6 a 28,3 millones de toneladas en ese lapso. De continuar esta tasa, se espera que la producción se eleve de 29,0 millones de toneladas en 2017 a 32,1 en 2021. Las importaciones de maíz que realizó México de los Estados Unidos de Norteamérica son básicamente de grano amarillo y crecieron a una tasa promedio anual de 4,8 por ciento de 1990 a 2016, elevándose de poco más de 4 millones de toneladas a cerca de 14 millones en ese periodo. De continuar esta tendencia en el lustro de 2017 a 2021, la cantidad importada aumentará de 14,6 a 17,7 millones de toneladas. México ha realizado ventas marginales al exterior de grano blanco cuando tiene excedentes, obteniendo un récord en 2016 de 1,7 millones de toneladas por la buena cosecha que obtuvo. El consumo aparente de maíz blanco y amarillo en México (331,6 kg per cápita en 2016) pasó de 18,7 a 40,6 millones de toneladas de 1990 a 2016, respectivamente. Creciendo a una

tasa promedio anual de 3 por ciento, este consumo aumentaría de 41,8 millones de toneladas en 2017 a cerca de 47 millones en 2021.

México es autosuficiente en maíz grano blanco para consumo humano y lo seguirá siendo si aumenta la producción nacional. Las importaciones de maíz amarillo continuarán en aumento en el mediano plazo, a menos que el gobierno mexicano fomente sustancialmente, las áreas de reconversión productiva. El consumo aparente de maíz blanco y amarillo continuará con su tendencia ascendente en el mediano plazo, lo cual confirma que el maíz seguirá siendo la base de la alimentación de la gran mayoría de los mexicanos.

Palabras clave: maíz blanco, producción, consumo, territorio y rural.

5. ÓPTIMOS ECONÓMICOS DE FERTILIZANTE EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BLANCO EN VALLES ALTOS

Manuel Vargas-Salgado^{1§}, Marcos Portillo-Vázquez¹, José de Jesús Brambila-Paz², Miguel Ángel Martínez-Damián², Sergio Ernesto Medina-Cuellar³.

¹Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (5517 2661 42, §autor para correspondencia: mvargass@chapingo.mx; mportillo49@yahoo.com.mx).

²Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, C.P. 56230. (jbrambilaa@colpos.mx; angel01@colpos.mx). ³Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de Arte y Empresa, Km. 3.5+1.8 Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, Guanajuato, C.P. 36885 (se.medina@ugto.mx).

5.1 Resumen

La producción de maíz blanco se realiza en la mayoría de las áreas agrícolas de México, con cerca de 64 razas de maíces seleccionados en miles de años por grupos indígenas y mestizos y con híbridos y variedades mejoradas. Las tecnologías de producción empleadas por los productores varían desde las tradicionales, las intermedias hasta las más modernas que usan paquetes tecnológicos avanzados. Existen productores que aplican altas dosis de fertilizantes y densidades de siembra elevadas, con procesos muy mecanizados y obtienen los más altos rendimientos por hectárea; pero hay otros agricultores que aplican menores dosis de fertilización, obtienen más bajos rendimientos y logran mayores ganancias. El presente trabajo se propone identificar en experimentos de campo, la dosis óptima económica de fertilizante (F) para que los productores logren la máxima ganancia. El experimento se realizó en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo empleando un diseño experimental completamente al azar con dos repeticiones, durante el ciclo primavera-verano de 2019. La función de producción cuadrática de maíz blanco estimada permitió calcular la dosis óptima económica o de máxima

ganancia de F (848 kg ha⁻¹), tomando en cuenta los precios de mercado del maíz y del fertilizante; también la dosis de máximo rendimiento (1,893 kg ha⁻¹). Los resultados obtenidos servirán de criterio económico para la toma de decisiones de producción de productores pequeños con escasos recursos, quienes podrían aplicar solo 424 kg de F en ½ ha y de productores medianos y grandes, que pueden aplicar la cantidad de F para obtener la máxima ganancia.

Palabras clave: Función de producción, máxima ganancia, máximo rendimiento.

5.2 Summary

The production of white corn is carried out in most of the agricultural areas of Mexico, with about 64 races of maize selected in thousands of years by indigenous and mestizo groups and with hybrids and improved varieties. The production technologies used by the producers vary from the traditional, the intermediate to the most modern ones that use advanced technological packages. There are producers who apply high doses of fertilizers and high planting densities, with highly mechanized processes and obtain the highest yields per hectare; but there are other farmers who apply lower doses of fertilization, obtain lower yields and achieve higher profits. The present work aims to identify in field experiments, the optimal economic dose of fertilizer (F) for producers to achieve maximum profit. The experiment was carried out in the Experimental Agricultural Field of the Universidad Autónoma Chapingo using a completely randomized experimental design with two repetitions, during the spring-summer 2019 cycle. The estimated quadratic production function of white corn allowed the calculation of the optimal economic dose of F with maximum profit (848 kg ha⁻¹), taking into account the market prices of corn and fertilizer and the maximum yield dose (1,893 kg ha⁻¹). The results obtained will serve as an economic criterion for making production decisions of small producers with scarce resources, who could apply only 424 kg of F in ½ ha and of medium and large producers, who can apply the amount of F to obtain the maximum profit.

Keywords: Production function, maximum profit, maximum yield.

5.3 Introducción

La producción de maíz blanco se realiza en casi todas las regiones geográficas y zonas rurales de México en una gran diversidad de ambientes: húmedos, secos, fríos y calientes. También se cultiva desde el nivel del mar hasta cerca de los 3,400 msnm y con una diversidad de prácticas agrícolas y de usos de más de 80 etnias indígenas y de muchos pueblos mestizos que siembran 64 razas de maíces resultado de un proceso de domesticación, selección y evolución bajo cultivo realizada por estos grupos indígenas desde hace 8,000 años y más recientemente también por los grupos mestizos (Wellhausen et al., 1951; Kato et al., 2009, Biodiversidad, 2020 y SAGARPA, 2012). El cultivo de maíz ocupó el 89 por ciento de la producción nacional de granos básicos en el año agrícola 2018 (SADER-SIAP, 2019). Se cultiva bajo diferentes sistemas de producción y con distintas tecnologías empleadas por campesinos que producen para autoconsumo, pequeños y medianos productores que generan una parte para autoconsumo y otra para el mercado regional y los productores grandes (comerciales) que producen principalmente para la industria tortillera nacional y para elaborar alimentos para consumo animal, féculas, aceite vegetal y almidones, entre otros productos.

El maíz grano es la base de la alimentación de la gran mayoría de los mexicanos, por esa razón el consumo anual per cápita fue de 345.6 kg en 2018 (SIAP, 2019). Existe consenso en la comunidad científica interesada en el tema del maíz que México es el centro de origen, domesticación y diversificación de este cereal (Kato et al., 2009). No obstante, la gran riqueza de la biodiversidad y de las condiciones naturales, culturales y experiencia milenaria de su producción por grupos étnicos de México, no se produce todo el maíz que la sociedad mexicana requiere para satisfacer sus necesidades alimenticias, debido a ello, se importó en 2018 una cantidad equivalente al 38 por ciento del consumo aparente nacional, aunque la mayor parte fue de maíz amarillo, materia prima necesaria para elaborar alimentos para consumo pecuario y para la agroindustria. Las importaciones de maíz representaron el 56 por ciento de la producción nacional, lo cual refleja una fuerte dependencia del abasto exterior.

Existen productores de maíz blanco en México que aplican altas dosis de fertilizantes y densidades de siembra elevadas, con procesos muy mecanizados y obtienen los más altos rendimientos por hectárea; pero hay agricultores, generalmente con menos recursos, que aplican dosis inferiores de fertilización, obtienen más bajos rendimientos y logran mayores ganancias. Quizás los primeros estén aplicando sobredosis de insumos que los lleven a obtener menores beneficios. Esto constituye un problema económico para los productores de maíz, al cual se le debe dar una solución económica. El objetivo que se persigue en esta investigación es identificar las dosis óptimas económicas de fertilizante en experimentos de campo, empleando un diseño experimental completamente al azar. Lo cual permitirá a los productores de maíz usar sus recursos escasos de manera más eficiente para lograr la máxima ganancia de la inversión en fertilizantes.

Swanson, E.R. *et al.* (1973) investigaron los niveles económicamente óptimos de fertilizante nitrogenado para maíz de 1967 a 1971 en ocho lugares diferentes de Illinois. Estimaron funciones de respuesta para cada año en cada ubicación que relacionan el rendimiento del maíz con el fertilizante nitrogenado. Las tasas económicamente óptimas en condiciones de poder pronosticar la temporada y con las relaciones de precios promedio de ese periodo variaron de 100 libras por acre en Brownstown a 290 libras por acre en DeKalb. Se utilizaron tres modelos de decisión basados en la teoría de juegos para estimar las tasas óptimas para cada ubicación en condiciones en las que el productor no puede predecir la temporada. La tasa óptima indicada fue de 200 libras o más.

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) investigó en 1983 la Respuesta de Maíz a N y P en Veracruz, México y por simplicidad solamente ajustó una función cuadrática (polinomio de segundo grado), en la cual además de considerar los niveles de fertilización como variables explicativas, incorporó otra variable de sitio que es el tipo de suelo (L = 1 para ladera y L= 0 para planicie) con ello mejoró sustancialmente la explicación del modelo y considerando los precios de mercado de los nutrientes y el precio de maíz, calculó los óptimos económicos para $N^* = 109 \text{ kg ha}^{-1}$ y $P^* = 71 \text{ kg ha}^{-1}$, en (Jauregui y Sain, 1992). Stone *et al.* (2010) investigaron la respuesta del

rendimiento de maíz al fertilizante nitrógeno y al riego en la Llanura Costera Sureste, la respuesta general del rendimiento para los tratamientos de riego combinado con N fue cuadrática en 1999 y 2000, alcanzando un límite superior potencial en la producción y lineal en 2001, mostrando mayores rendimientos con aplicaciones adicionales de N. Para el tratamiento de temporal, la respuesta del rendimiento al fertilizante N fue lineal en los tres años. Aguilar-Carpio, C. *et al.* (2015) analizaron el rendimiento y rentabilidad de maíz en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno en Iguala, Guerrero, México en 2011. Encontraron que la materia seca (MS) y el rendimiento en grano (RG) más alto se logró con la combinación de H-562, biofertilizante y 160 kg N ha⁻¹ (30000 y 9243 kg ha⁻¹, respectivamente) y el más bajo correspondió al tratamiento VS-535, con biofertilizante (Bio) y sin nitrógeno (17030 y 3760 kg ha⁻¹, respectivamente). El mayor ingreso neto se obtuvo con H-562 y 160 kg N ha⁻¹ independientemente del uso de Bio. El empleo de Bio más 80 kg N ha⁻¹ con H-562 generó la mayor ganancia por peso invertido (GPI), debido a que por cada peso invertido, se recuperaron \$ 4.33.

Según Martínez-Gutiérrez, A. *et al.* (2018), en los últimos años, se han realizado trabajos constantes en el programa de mejoramiento genético del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), para incrementar el rendimiento de grano de maíz con la liberación de nuevas variedades mejoradas (Espinosa *et al.*, 2003; Espinosa *et al.*, 2008b; Espinosa *et al.*, 2010; Espinosa *et al.*, 2012; Tadeo *et al.*, 2016a y Espinosa *et al.*, 2018), al mismo tiempo se efectuaron investigaciones sobre adopción de las mejores prácticas de la fertilización química y foliar y manejo en el cultivo de maíz en Valles Altos (Zamudio *et al.*, 2015). Estas investigaciones serían de mayor utilidad para los productores de maíz que adoptan dichas semillas si se complementaran con el análisis económico para determinar densidades óptimas de semilla y dosis óptimas económicas de fertilizante para que los agricultores eleven al máximo sus ganancias. Una de las conclusiones a las que llegaron Martínez-Gutiérrez, A. *et al.* (2018) es que los híbridos evaluados presentaron rendimientos superiores al testigo comercial H-50 (11.5 t ha⁻¹) y al promedio de la región, lo cual representa una alternativa para las empresas productoras de

semillas y para que los agricultores tengan acceso a semillas mejoradas con ventajas agronómicas y económicas mayores para la producción de granos en Valles Altos de México. De acuerdo con Zamudio *et al.*, (2015), en Valles Altos del Estado de México bajo clima favorable se obtuvieron altos rendimientos de grano de maíz con promedio general de 12.07 t ha⁻¹. Los altos rendimientos obtenidos se deben a la utilización de nuevos híbridos y la adopción de las mejores prácticas agrícolas (MPAs) entre las cuales se destaca la fertilización al suelo y la nutrición foliar.

5.4 Materiales y métodos

Para realizar el estudio de la producción técnica de un cultivo se debe examinar, en principio, la relación que existe entre los nutrientes y el rendimiento (Martínez, 1971; Jauregui y Sain, 1992 y Portillo, 2015). Esta relación puede representarse convenientemente en forma matemática. Si se denota las dosis de los nutrientes (insumos) N, P, K, ..., aplicados al suelo por unidad de superficie, por las letras n, p, k, \dots , y por Y al rendimiento del cultivo por unidad de superficie, se puede representar:

$$Y = f(n, p, k, \dots) \quad (1)$$

donde f puede ser una función cúbica, cuadrática, exponencial, etc. Se denotará a la relación (1) "función de producción". Desde el punto de vista económico la aplicación de N, P, K, ..., tiene un costo que está determinado por la relación:

$$CT = g(n, p, k, \dots) \quad (2)$$

donde CT es el costo total de aplicación de los nutrientes por unidad de superficie, el cual es una función de las dosis de n, p, k, \dots ; se denotará a la relación (2) "función de costo total". Una de las funciones de mayor uso en la práctica, es una función de la forma:

$$CT = CF + P_N n + P_P p + P_K k + \dots, \quad (3)$$

donde CF representa los costos fijos de aplicación; y los símbolos P_N, P_P, P_K, \dots , los precios unitarios de mercado de los nutrientes N, P, K, ..., respectivamente.

El ingreso total del productor viene dado por $P_Y Y$, donde P_Y es el precio unitario de mercado del producto. Definiendo el óptimo económico como la cantidad de nutriente que genera el rendimiento o la producción de máxima ganancia o beneficio económico, dicha cantidad de insumo se obtiene, igualando el valor del producto marginal del insumo ($VPMgl = PMgl * P_Y Y$) al precio del insumo $P_I = P_N, P_P, P_K, \dots$, lo cual es equivalente a igualar el producto marginal del insumo (recurso), ($PMgl = \partial Y / \partial I$) a la relación de precios del nutriente con el precio del producto (P_I / P_Y), como se plantea en la ecuación (4). Matemáticamente, el problema se circunscribe a encontrar el máximo del producto $P_Y Y$ sujeto a la restricción (3) suponiendo una función de costo lineal. Formando la siguiente función de Lagrange:

$$L = P_Y Y + \lambda (CT - CF - P_N n - P_P p - P_K k - \dots)$$

Derivando L sucesivamente con respecto a n, p, k, \dots , e igualando las correspondientes igualdades a la relación de precio insumo/producto, se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial n} = \frac{P_N}{P_Y}$$

$$\frac{\partial L}{\partial p} = \frac{P_P}{P_Y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial k} = \frac{P_K}{P_Y}$$

El sistema de ecuaciones (4) se resuelve simultáneamente. Los valores que se obtengan de n, p, k, \dots , deben satisfacer al sistema y son las dosis óptimas de los recursos.

Cuando se consideran los CF de la aplicación de los fertilizantes, puede suceder que el valor del incremento en el rendimiento no sea suficiente para solventar los CT de aplicación. Las aplicaciones de dosis bajas pueden ser insuficientes para pagar los CF, aun cuando cubran los costos variables $P_N n + P_P p + P_K k + \dots$, de la ecuación (3). Del planteamiento precedente se deduce que debe existir un valor mínimo de n, p, k, \dots , cuyas aplicaciones inferiores a estas dosis mínimas producirán pérdidas en lugar de la ganancia deseada. Pesek y Heady (1958)

citados en (Martínez, 1971) sugieren que se consideren como dosis mínimas de aplicación las cantidades de insumos que hacen máximas las ganancias netas por unidad monetaria. Considerando que la ganancia total es la diferencia: $\pi = P_Y Y - CT$; de donde la ganancia neta por unidad monetaria que se gasta se denota como G y se define como sigue: $G = (P_Y Y - CT) / CT$. Las dosis de N, P, K, \dots , para las cuales G es un máximo se calculan resolviendo simultáneamente el sistema:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial n} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial p} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial k} &= 0\end{aligned}\tag{5}$$

Nótese que CT en el sistema anterior no es una constante, si no que CT es una función de las dosis n, p, k, \dots . Las cantidades que se obtienen al resolver el sistema (5), se deben usar en la práctica de la forma siguiente: cuando un agricultor no tiene los recursos o el suficiente fertilizante para abonar toda su parcela, a las dosis mínimas recomendadas, deberá aplicar su fertilizante a estas cantidades mínimas hasta que se le termine y el resto de la superficie se dejará sin fertilizar (Martínez, 1971; Portillo, 2015), toda vez que otra combinación distinta de dosis y superficie reducirá las ganancias para una cantidad determinada de fertilizante.

Según algunos investigadores (Martínez, 1971; Jauregui y Sain, 1992 y Portillo, 2015) la respuesta clásica de los cultivos a las adiciones sucesivas de fertilizantes sigue la Ley de Rendimientos (“Marginales”) Decrecientes. “... A dosis bajas de los nutrientes, incrementos en las dosis producen incrementos mayores en los rendimientos, e inversamente a dosis altas de los nutrientes, incrementos en las dosis producen incrementos menores en los rendimientos” (Martínez, 1971, p. 20). De lo anterior se deduce que en la práctica se utilizan funciones matemáticas que representan empíricamente la ley de los rendimientos decrecientes. Las funciones matemáticas utilizadas con mayor

frecuencia son: funciones del tipo exponencial, polinomios de tercer grado y de segundo grado, entre otras (Martínez, 1971; Beattie y Taylor, 1993 y Nicholson, 2002). Los polinomios de segundo grado permiten una representación muy razonable de las respuestas de un cultivo a las aplicaciones de nutrientes. Para el caso de 1 y 2 dos insumos se tiene las ecuaciones siguientes:

$$N: Y = \beta_0 + \beta_{1n} + \beta_{2n^2} \quad (6)$$

$$N, P: Y = \beta_0 + \beta_{1n} + \beta_{2p} + \beta_{3n^2} + \beta_{4p^2} + \beta_{5np} \quad (7)$$

El sistema de ecuaciones (4) se reduce sencillamente a la siguiente ecuación para el caso de un nutriente o de una fórmula balanceada de fertilizante (F):

$$\beta_1 + 2\beta_{2n} = \frac{P_N}{P_Y}, \text{ de donde}$$

$$n^* = \frac{1}{2\beta_2} \left(\frac{P_N}{P_Y} - \beta_1 \right) \quad (8)$$

donde n^* o f^* es la dosis óptima de N o de F, respectivamente.

Aunque se reconoce que los agricultores eligen entre varios objetivos alternativos a la hora de decidir si adoptan o no una tecnología, dos factores importantes en esas decisiones son los retornos económicos y el grado de riesgo que implica la adopción de una nueva alternativa tecnológica (CIMMYT, 1988). Para evaluar los rendimientos económicos en el caso de un solo nutriente, se supone que los agricultores intentan maximizar los beneficios por unidad de tierra (π), definido como (Jauregui y Sain, 1992):

$$\pi = BBC - CTV (1 + R) + CTNV,$$

$$\pi = P_0Y - P_F F - CTNV, \quad (9)$$

donde BBC representa los beneficios brutos de campo calculados multiplicando el rendimiento ajustado (Y) multiplicando por el precio de campo del cultivo (P_0); CTV representa los costos totales que varían; TCTNV son los costos totales que no varían; y R es la tasa mínima de rendimiento aceptable para los agricultores (principalmente el costo del capital y el retorno a las habilidades gerenciales).

Debe tenerse presente que la suma de CTV y CTNV denota el costo total por unidad de tierra. Los costos totales que varían se calculan multiplicando la cantidad de nutrientes por unidad de tierra (F) por el precio de campo del nutriente (P_f).

Los agricultores tratan de maximizar los beneficios por unidad de tierra (Ecuación 9) sujeto a la restricción impuesta por la tecnología, que se resume en la función de respuesta, $Y = f(F)$. La condición de primer orden para un máximo sin restricciones de la Ecuación 9 es:⁴

$$d\pi / dF = P_0 f_f - P_f (1 + R) = 0,$$

$$\text{o } P_0 f_f = P_f (1 + R), \tag{10}$$

$$f_f = \frac{P_f (1+R)}{P_0}. \tag{11}$$

Según la Ecuación 10, la maximización del beneficio requiere que el valor de la productividad física marginal del nutriente F sea igual a su costo marginal (precio de nutriente) por $(1+R)$. Esto significa que el último peso gastado en nutriente F debe retornar exactamente un peso más un retorno adicional que satisfará a los agricultores de que su inversión vale la pena.

La ecuación 11 establece el mismo principio, pero en términos físicos: el agricultor aplicará el nutriente F hasta que la cantidad de producto añadido por la aplicación de la última unidad de nutriente sea igual a la cantidad de producto necesaria para comprar la última unidad de nutriente, por $(1 + R)$. Dado que f_f es una función de F, la condición de primer orden se puede resolver para F en función de P_f , P_0 y R:

$$F^* = g (P_0, P_f, R), \tag{12}$$

⁴ La condición de segundo orden para un máximo requiere que $d^2\pi / dF^2 = - P_0 f_{ff} < 0$. Dado que $P_0 > 0$ esta condición implica que los beneficios máximos requieren una productividad física marginal decreciente del nutriente ($f_{ff} < 0$).

donde N^* es la demanda derivada del nutriente F, ya que representa la cantidad de maximización de beneficio del nutriente en función de los precios de nutriente y producto.

Los precios de los nutrientes derivados de los precios oficiales de los fertilizantes comerciales se utilizan con frecuencia en la evaluación de los resultados experimentales; del mismo modo, los precios de la producción a menudo se estiman "ingenuamente" utilizando precios oficiales o de apoyo. Este procedimiento ignora varios elementos de los costos de los fertilizantes, así como de los beneficios brutos, todos los cuales deben ser considerados si se van a desarrollar recomendaciones sólidas (Byerlee y Harrington, 1981). Estos elementos incluyen los costos asociados con la aplicación de fertilizantes, el costo de capital para la compra de fertilizantes y los costos relacionados con la cosecha del rendimiento adicional. Cuando se contabilizan todos estos factores, la cantidad óptima de fertilizante recomendado puede estar muy por debajo de la recomendación derivada mediante el uso de precios ingenuos. Por lo tanto, al adaptar las recomendaciones a los pequeños agricultores, es importante utilizar los precios pertinentes, y cualquier medio para obtener precisión vale la pena. Las siguientes directrices para estimar los precios de campo de nutrientes y productos resumen brevemente los métodos más detallados indicados en CIMMYT (1988).

El precio de campo del nutriente se estima tomando en cuenta todos los costos en los que el agricultor debe incurrir para aplicar una unidad del nutriente. El primer paso es ajustar el precio de venta del fertilizante comercial en la tienda local por el costo de transporte del fertilizante al campo del agricultor. El segundo paso es calcular el precio de campo del nutriente ajustando el precio de campo del fertilizante por el contenido de nutrientes.

Además de los costos de los nutrientes, otros dos costos están involucrados en la recomendación de fertilizantes: el costo de capital para comprar el fertilizante y el costo del trabajo para aplicar el fertilizante. El fertilizante se compra al comienzo del período de cultivo, mientras que los rendimientos para aplicar éste se reciben al final del período, por lo general de seis a ocho meses más tarde.

Los investigadores deben estimar estos costos cuidadosamente para utilizar la relación de precios adecuada en el análisis económico.

Al determinar los costos del trabajo, se debe tener cuidado cuando la labor familiar está involucrada y los salarios de oportunidad pueden ser estimados. Además, con frecuencia es necesaria una aproximación menor, ya que los costos de mano de obra a menudo se expresan como una suma global por unidad de tierra y se necesita expresarlos por unidad de nutriente. Dadas las magnitudes involucradas en la mayoría de los casos, el error introducido al aproximar los costos de mano de obra por unidad de nutriente es generalmente insignificante y puede ser ignorado.

El investigador también debe estimar la tasa mínima de retorno aceptable para los agricultores de la región (R). Esta tasa se aproxima a la voluntad de los agricultores de adoptar una recomendación determinada y abarca el costo del capital, así como un factor que comprende el retorno a la gestión. Cuando el acceso de los agricultores al crédito formal puede ser limitado o inexistente, es importante estimar el costo del capital con gran cuidado. En el CIMMYT (1988) se ofrece una descripción más detallada de cómo estimar la tasa mínima de retorno aceptable para los agricultores de una región y cómo estimar el costo para aplicar el fertilizante.

En resumen, el precio del nutriente relevante que se utilizará en la evaluación económica es $P_n (1+R)$, donde, P_n = precio de campo del nutriente = $[(P_{vf} + t)/c] + I$, donde P_{vf} = precio de venta del fertilizante (p. ej., urea), t = costo de transportar cada unidad de fertilizante, I = costo de aplicar cada unidad de nutriente y c = la composición nutritiva del fertilizante (por ejemplo, 0.46 kg N por cada kilogramo de urea).

Para estimar los beneficios brutos de campo, los rendimientos ajustados deben multiplicarse por el precio de campo del producto.

Es razonable pensar que los agricultores no lograrán los mismos rendimientos que los obtenidos en un tratamiento experimental debido a varios factores, como el nivel de gestión, el tamaño de la parcela, la fecha de cosecha y la forma en

que se realiza la cosecha. Por lo tanto, para obtener el rendimiento ajustado, el rendimiento experimental debe ajustarse hacia abajo mediante un coeficiente que tenga en cuenta estos factores. CIMMYT (1988) proporciona ejemplos para estimar los rendimientos ajustados.

Los agricultores incurrirán en costos adicionales como consecuencia de la obtención de mayores rendimientos, tales costos están relacionados con la cosecha y su recolección. Estos costos se contabilizan tomando el precio de venta del cultivo en el momento y lugar en que los agricultores lo venden y restando todos los costos que son proporcionales al rendimiento (C_y), es decir, los costos que pueden expresarse por unidad de producto (por ejemplo, los costos de cosecha, trilla y transporte del grano).

Con estos ajustes, los beneficios brutos de campo (BBC) se calculan como:

$$\text{BBC} = Y(1-a) P_0 = Y(1-a) (P_{v0} - C_y), \quad (13)$$

donde Y es el rendimiento experimental; a es el ajuste a la baja por el menor rendimiento que es probable que los agricultores obtengan, en comparación con los rendimientos obtenidos en los experimentos realizados por los investigadores en los campos de los agricultores; P_0 es el precio de campo del producto, que es igual a la diferencia entre P_{v0} , el precio de venta del producto y, C_y , la suma de todos los costos proporcionales al rendimiento. Estos beneficios son brutos por que solo consideran el total de los costos que varían cuando se aplica un insumo variable, tal como fertilizante. De manera similar se pueden calcular los BBC para un cultivo asociado y/o para un subproducto como el rastrojo de maíz, como se observa en (CIMMYT, 1988 & Jauregui y Sain, 1992).

En resumen, una fórmula de trabajo para calcular la relación de precios relevante, r , sería:

$$r = P_n (1 + R) / P_0 (1 - a),$$

$$r = [(P_{vf} + t) / c + I] (1 + R) / (P_{0v} - C_y) (1-a). \quad (14)$$

Se debe tener en cuenta que es más conveniente trabajar con los rendimientos originales y realizar todos los ajustes, incluido el del rendimiento con el precio de venta.

La cantidad óptima de F se calcula de la siguiente manera:

$$F^* = (r - b_1) / 2 b_2. \quad (15)$$

Donde: b_1 es el valor del parámetro del término lineal y b_2 es el valor del coeficiente del término cuadrático de la función de producción estimada.

Para calcular el aumento mínimo requerido de rendimiento de producto, ΔY , que el agricultor necesita para agregar un kg de F se estima de la siguiente manera:

$$\Delta Y = \Delta TCV (1 + R) / P_0 \quad (16)$$

Donde: ΔTCV es el cambio del total de los costos que varían; es decir, el costo de un kg de fertilizante más la mano de obra para aplicarlo, P_0 el precio de campo del producto y R la tasa de retorno mínima.

El experimento se estableció el 27 de mayo del 2019. Se utilizaron dos variedades de maíz (Estrella y Celeste) a las cuales se les aplicó diferentes dosis de fertilización con la finalidad de evaluar posteriormente el rendimiento de grano. El experimento se desarrolló en el Campo Agrícola Experimental "El Ranchito", en el lote X-11, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México. El lote se ubica geográficamente entre los paralelos 19°24' y 19°33' de latitud norte; los meridianos 98°38' y 99°02' de longitud oeste.

5.4.1 El análisis de suelo y la fórmula de fertilización

Se realizó un muestreo de suelo previo al establecimiento del cultivo. Se recolectaron 15 submuestras de manera aleatoria de tal manera que éstas fueran representativas del terreno, posteriormente se formó una muestra compuesta que fue enviada al laboratorio de análisis químico NUTRELAB para la determinación de su fertilidad, mediante los métodos establecidos en la NORMA Oficial Mexicana NOM-021- SEMARNAT-2000.

En el análisis de suelo se encontró bajo contenido de materia orgánica y de nitrógeno inorgánico (N), mientras que, cantidades en exceso de fósforo (P_2O_5) y de potasio (K_2O). En contenido de micronutrientes, hubo deficiencia de Cu; nivel bajo de Fe y Zn; medio de CaO; alto de Mn y exceso de Mg y de B. El CIC también fue bajo y medio el pH. Tomando en cuenta esta información y los requerimientos del cultivo de maíz para producir un rendimiento promedio esperado de 10 t ha^{-1} , se elaboró la fórmula balanceada de fertilizante (F) con los contenidos siguientes: 23% de N, 0% de P_2O_5 , 26.53% de K_2O , 17.73% de CaO más la mezcla de micronutrientes antes mencionados. Se utilizó un diseño de tratamientos bifactorial 2×5 . El primer factor consistió en dos variedades de maíz (Estrella y Celeste). El segundo factor en cinco dosis de fertilización (T0: Testigo absoluto; T1: Dosis del productor; T2:1/2 de la dosis óptima; T3: Dosis óptima y T4:1+1/2 de la dosis óptima. El T0 consistió en no aplicar ningún tipo de fertilizante al suelo o a la planta; el T1 fue la que se investigó con productores de la región (400 kg ha^{-1} de F) y la dosis óptima se realizó con base en el análisis de suelo la cual fue de $1,200 \text{ kg ha}^{-1}$ (con $276N-0P-318K-213CaO$ + micronutrientes) y sirvió de punto de referencia para los tratamientos T2 y T4.

5.4.2 Diseño de tratamientos

El cultivo se desarrolló bajo condiciones de temporal con riegos de auxilio cada 15 días cuando se presentó sequía. Los tratamientos se dispusieron en un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro repeticiones cada una. Cada lote o unidad experimental midió 8.8 m de ancho por 20 m de largo dando una superficie de 176 m^2 y una densidad de siembra de 1,056 plantas, equivalente a 60,000 plantas por hectárea.

Cuadro 1. Resultado del análisis de suelo y la fórmula de fertilización.

Nutrientes	Contenido en mg kg^{-1}	Clasificación nutrimental	Recomendaciones de fertilizantes kg ha^{-1}	Fórmula de fertilización kg ha^{-1}			
				400	600	1200	1800
Materia orgánica	1.41%	Bajo	14516.70	-	-	-	-
Nitrógeno inorg.	14.00	Bajo	161.80	92	138	276	414

Fósforo (P ₂ O ₅)	49.59	Exceso	3.40	0	0	0	0
Potasio (K ₂ O)	293.74	Exceso	186.70	106	159	318	476
Calcio (CaO)	1410.96	Medio	125.00	71	106	213	319
Magnesio (Mg)	631.90	Exceso	0.00	0	0	0	0
Hierro (Fe)	10.26	Bajo	2.18	0.56	1.08	2.18	3.27
Manganeso (Mn)	47.42	Alto	0.00	0	0	0	0
Zinc (Zn)	0.85	Bajo	5.30	1.59	2.65	5.30	7.95
Cobre (Cu)	0.50	Deficiente	3.40	1.02	1.70	3.40	5.10
Boro (B)	0.72	Exceso	1.14	0.34	0.57	1.14	1.71
CIC (me/100g)	12.00	Bajo	-	-	-	-	-
Azufrar (pH)	5.85	Medio	-	-	-	-	-

Nota: CIC= Capacidad de intercambio catiónico. me = miliequivalentes por 100g.

Fuente: Análisis de suelo realizado por el laboratorio NUTRELAB.

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron las mejores prácticas agrícolas de fertilización, deshierbe, escarda, aporque y riegos de auxilio hasta su maduración y se cosecharon 5 mazorcas en un metro lineal, en competencia completa, de cada uno de los tratamientos el día 6 de noviembre de 2019 habiendo transcurrido 163 días, se dejaron secar hasta tener el grano una humedad promedio de 14%, se desgranaron y se procedió a su peso, en una balanza analítica, para estimar el rendimiento promedio por hectárea de maíz. Una vez que se capturó, ordenó y sistematizó esta información se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el paquete de cómputo Sistem Analysis Statistical (SAS) versión 9, para probar la igualdad de tratamientos con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis nula. También se realizó la prueba de contrastes y las Técnicas de Comparaciones Múltiples más sobresalientes: Tukey, de Bonferroni, de Scheffé y la de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para probar todas las comparaciones posibles de las medias, comparadas de dos en dos.

Asimismo se uso el análisis de regresión para estimar la función de producción cuadrática y se interpretaron y discutieron los resultados (Infante y Zárate, 2010).

5.5 Resultados y discusión

En seguida se presentan los resultados del análisis de varianza:

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza.

FUENTES DE VARIACIÓN	G. L.	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	F ₀
Tratamientos (entre)	4	14803149.50	3700787.38	4.58
Error (dentro)	15	12108248.50	807216.57	
Total	19	26911398.00		

G. L. = Grados de libertad.

Fuente. Elaboración propia con datos del experimento.

Para probar $H_0 : T_0 = T_1 = T_2 = T_3 = T_4$ contra H_a : al menos un tratamiento diferente de los demás, con $\alpha = 0.05$, se obtiene $F_{4, 15} (0.05) = 3.056$ de la tabla apropiada y; dado que $F_0 > 3.056$, se rechaza H_0 con $\alpha = 0.05$ y se concluye que al menos un tratamiento (dosis de fertilización) es diferente a los demás (genera un rendimiento promedio diferente a los demás).

A continuación, se exploran las posibles diferencias entre los tratamientos del DCA utilizando contrastes. Con esta técnica de contrastes se pueden hacer preguntas más específicas, como: ¿son diferentes los efectos de los tratamientos T1 y T2? ¿Es diferente el efecto del tratamiento T0 del promedio de los efectos de los tratamientos T2 y T3? Para indagar si T_1 es diferente de T_2 se formula el contraste $Q = T_1 - T_2$.

Cuadro 3. Técnica de contrastes para probar si son diferentes los efectos de los tratamientos T1 y T2.

Parámetros (T_i)	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Estadísticas
----------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	--------------

Coeficientes (C _i)	0	1	-1	0	0	ΣC _i = 0
Medias (Ȳ _{i.})	9148	10771	10204	11238	11599	Q = ΣC _i T _i = T ₁ - T ₂
Tamaño de muestra (n _i)	4	4	4	4	4	Q̂ = ΣC _i Ȳ _{i.} = 567.2
						Σ $\frac{c_i^2}{n_i} = 0.5$

Fuente: Elaboración propia.

Donde: $E(\hat{Q}) = Q$, $Var(\hat{Q}) = \sigma_{\hat{Q}}^2 = 0.5 \alpha^2$. Un estimador de $\sigma_{\hat{Q}}^2$ se obtiene reemplazando σ^2 por el CM Error de la tabla de ANOVA. Resultando: $S_{\hat{Q}}^2 = (0.5)(807216.57) = 403,608.29$. Probar $T_1 - T_2$ en contra de $T_1 \neq T_2$ es igual a probar $H_0 : Q = 0$ en oposición a $H_a : Q \neq 0$, donde $Q = T_1 - T_2$. En este caso la estadística apropiada es:

$$t_0 = \frac{\hat{Q} - 0}{S_{\hat{Q}}} = \frac{567.2}{\sqrt{403608.29}} = 0.8928$$

donde $t_0 = 0.8928$ se compara con $t_{\alpha/2}(15)$ para decidir si se rechaza H_0 con un nivel α de significancia (los G.L. son los del CM Error de la tabla de ANOVA). En la tabla de t se observa que H_0 no se rechaza para ninguna α razonable (excepto $\alpha = 0.25$); con lo cual se concluye que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los rendimientos promedio de los tratamientos de fertilizante de 400 y 600 kg ha⁻¹.

En seguida se formula el contraste para indagar si hay diferencias entre el efecto del tratamiento T₀ y el promedio de los efectos de los tratamientos T₂ y T₃. Una manera es con el contraste $2T_0 - T_2 - T_3$, y otra por medio de $T_0 - \frac{1}{2}(T_2 + T_3)$. A continuación se presenta el primero:

Cuadro 4. Técnica de contrastes para probar si es diferente el efecto del tratamiento T₀ del promedio de los efectos de los tratamientos T₂ y T₃.

Parámetros (T _i)	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	Estadísticas
Coeficientes (C _i)	2	0	-1	-1	0	ΣC _i = 0

Medias (\bar{Y}_i)	9148	10771	10204	11238	11599	$Q = 2T_0 - T_2 - T_3$
Tamaño de muestra (n_i)	4	4	4	4	4	$\hat{Q} = \sum C_i \bar{Y}_i = -3146.56$
						$\sum \frac{C_i^2}{n_i} = 1.5$

Fuente: Elaboración propia.

Resultando: $S_{\hat{Q}}^2 = (1.5) (807216.57) = 1'210,824.86$. De tal manera que la hipótesis $H_0 : Q = 0$ en contra de $H_a : Q \neq 0$, se prueba a través de:

$$t_0 = \frac{\hat{Q} - 0}{S_{\hat{Q}}} = \frac{-3146.56}{\sqrt{1210824.86}} = -2.851$$

Los puntos críticos con $\alpha = 0.05$ son $t_{0.025} (15) = 2.131$ y $-t_{0.025} (15) = -2.131$, y dado que $t_0 < -2.131$ se concluye que si hay diferencia entre el rendimiento promedio del tratamiento T0 (testigo: 0 kg ha⁻¹) y el promedio en los tratamientos T2 y T3 (600 y 1200 kg ha⁻¹, respectivamente) con evidencia a favor de este último promedio, el cual es mayor que el del tratamiento T0.

Enseguida se presentan los resultados de las Técnicas de Comparaciones Múltiples más sobresalientes: el método de la Diferencia Mínima Significativa (DMS); las pruebas de Tukey y de Bonferroni y el procedimiento de Scheffé.

Cuadro 5. Comparación de medias con las Técnicas de Comparaciones múltiples sobresalientes.

Comparación de Fertilizante de medias	Diferencia	IC (95%) DMS	IC (95%) Tukey	IC (95%) Bonferroni	IC (95%) Scheffé
1800 – 1200	362.0	(-992.1 1716.1)	(-1599.8 2323.8)	(-1725.6 2449.6)	(-1859.0 2583.0)
1800 – 400	828.3	(-525.9 2182.4)	(-1133.5 2790.0)	(-1259.4 2915.9)	(-1392.8 3049.3)
1800 – 600	1395.3	(41.1 2749.4)*	(-566.5 3357.0)	(-692.4 3482.9)	(-825.8 3616.3)
1800 – 0	2452.0	(1097.9 3806.1)*	(490.2 4413.8)*	(364.0 4539.6)*	(231.0 4673.0)*
1200 – 400	466.3	(-887.9 1820.4)	(-1495.5 2428.0)	(-1621.4 2553.9)	(-1754.8 2687.3)
1200 – 600	1033.3	(-320.9 2387.4)	(-928.5 2995.0)	(-1054.4 3120.9)	(-1187.8 3254.3)

1200 – 0	2090.0	(735.9	3444.1)*	(128.2	4051.8)*	(2.4	4177.6)*	(-131.0	4311.0)
400 – 600	567.0	(-787.1	1921.1)	(-1394.8	2528.8)	(-1520.6	2654.6)	(-1654.0	2788.0)
400 – 0	1623.8	(269.6	2977.0)*	(-338.0	3585.5)	(-463.9	3711.4)	(-597.3	3844.8)
600 – 0	1056.8	(-297.4	2410.9)	(-905.0	3018.0)	(-1030.9	3144.4)	(-1164.3	3277.8)

*Medias estadísticamente significativas (0.05%). IC: Intervalo de confianza.

Fuente: Elaboración propia con información del experimento.

En el caso del método de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) y de acuerdo con los intervalos de confianza que consideran a cero inclusive, se puede señalar con un nivel de confianza del 5% que los tratamientos 1800 y 600; 1800 y 0; 1200 y 0; 400 y 0, son diferentes en sus efectos. Con los métodos de Tukey y de Bonferroni se observa que solamente los tratamientos 1800 y 0, 1200 y 0 tienen diferencias significativas (al 5%); con lo cual se muestran más conservadores que el de DMS, lo que podría tener la ventaja de darle mayor credibilidad a las conclusiones a las que se arriben. En el procedimiento de Scheffé únicamente el tratamiento 1800 y 0 es diferente significativamente en sus efectos, este método genera el valor crítico más alto, por esta razón, es el más conservador de estas Técnicas.

5.5.1 La función de producción cuadrática

Con los resultados obtenidos en el experimento de producción de maíz blanco, en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, durante el ciclo primavera-verano del año 2019 y después de probar diferentes formas funcionales como la lineal, la cuadrática, la cúbica, la trascendental, la logarítmica (véase Jauregui y Sain, 1992) y la Cobb-Douglas. Las que presentaron mejor ajuste fueron la lineal y la cuadrática. Esta última muestra que a cierto nivel de uso del insumo variable se empiezan a tener incrementos en producción positivos, pero cada vez de menor magnitud (productos marginales decrecientes). Se llega a un nivel de uso del insumo variable en el que la última unidad de este recurso no incrementa en nada a la producción (producto marginal cero). En este nivel de uso del insumo fertilizante se alcanza la máxima producción por hectárea. Este polinomio de segundo grado permite calcular el

óptimo económico y el óptimo técnico, por esta razón es el que se seleccionó y se presenta enseguida:

$$Y = 9129.9023 + 4.1646 F - 0.0011 F^2 - 1520.2652 C$$

$$R^2 = 0.61; R^2 \text{ ajustado} = 0.53. \quad (3.25)^{***} \quad (-1.86)^* \quad (-2.28)^{**}$$

Donde Y es el rendimiento de maíz en kg ha⁻¹, F es la fórmula de fertilizante aplicado en kg ha⁻¹ y C es una variable dummy (binaria) de manejo de ceros y unos, donde 0 representa el cultivo del año anterior: maíz y 1: barbecho. Los valores de t en los paréntesis; ***, ** y * denotan significancia estadística al 1%, 5% y 10%, respectivamente. Otras variables que pueden influir en el rendimiento de maíz, tales como la precipitación pluvial, el tipo de suelo, la degradación del suelo, la semilla y el tipo de siembra, el método de cosecha, la tierra, el trabajo, la maquinaria, el uso de herbicidas, entre otras, se suponen constantes en un nivel determinado, durante el ciclo del cultivo (Beattie y Taylor, 1993 y Rasmussen, 2013). Polinomios de segundo grado se obtuvieron en trabajos similares con N y P (fósforo) por CIMMYT en (Jauregui y Sain, 1992) y con sólo N (Stone, K. C. *et al.* 2010 y Aguilar-Carpio, C. *et al.*, 2015). El dato 9,129.9023 de la ordenada al origen representan el rendimiento atribuible a los factores diferentes a la fórmula, por lo que, si se omite este dato y se considera el resto de la función se obtienen los valores de producción correspondientes exclusivamente a los diferentes niveles de uso del fertilizante y de la variable binaria C:

$$Y = 4.1646 F - 0.0011 F^2 - 1520.2652 C$$

Para obtener el nivel de fertilizante que genera la máxima ganancia o máximo beneficio se busca la igualdad entre el producto marginal dado por la derivada de la función de producción y la relación de precios: precio del insumo/precio del producto, considerando los precios de mercado, imperantes en la zona, del insumo y del producto, \$11.50 y \$5.00 por kg, respectivamente, se busca el valor del factor donde el producto marginal sea igual a 2.3 = \$11.50/\$5.00. De tal forma que obteniendo la derivada de la función e igualando a 2.3, de manera similar como en las ecuaciones (4 y 8), se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial Y}{\partial f} = \frac{P_F}{P_Y} = 4.1646 - 0.0022 F = \frac{11.5}{5} = 2.3$$

$$F = \frac{-1.8646}{-0.0022}$$

= **848 kg ha⁻¹** es la dosis óptima económica o de máxima ganancia.

En cuanto al valor de F que genera el máximo rendimiento por hectárea, se obtiene igualando la derivada de la función a cero (producto marginal = 0) y despejando posteriormente el valor de F se tiene:

$$\frac{\partial Y}{\partial f} = 0 = 4.1646 - 0.0022 F = 0$$

$$F = \frac{-4.1646}{-0.0022}$$

= **1893 kg ha⁻¹** es la dosis óptima técnica o de máximo rendimiento.

Con base en la optimización económica, la cantidad óptima de fertilizante que deben aplicar los productores de maíz para obtener el máximo beneficio económico o ganancia (25,226.02 \$ ha⁻¹) es de 848 kg ha⁻¹. En virtud de que el óptimo es una variable aleatoria es posible estimar una región confidencial para éste como se muestra en (Castellanos-Pérez et al., 2006). Desde el punto de vista del análisis marginal, al productor de maíz le conviene producir cantidades adicionales de este grano, siempre y cuando el ingreso que obtenga por este producto sea mayor o igual que lo que le cuesta una unidad más de F, necesario para producir estas cantidades. Es decir, le convendrá producir una mayor cantidad de maíz, si el ingreso marginal (IMg) que obtenga por la venta de este grano es superior o igual que, lo que le cuesta un kg adicional de F (costo marginal: CMg), con el cual produce esa cantidad de grano. Con base en este criterio económico y al de máxima ganancia, ésta se alcanza cuando el IMg (\$11.50) es igual al CMg (\$11.50); lo cual es coherente con la elasticidad de producción ($\epsilon_p = 0.19$), que corresponde a la región económica de la función de producción ($0 < \epsilon_p < 1$). Por otra parte, la cantidad óptima técnica de F que genera el máximo rendimiento es de 1,893 kg ha⁻¹ (ver Cuadro 6); esta cantidad máxima de maíz por hectárea no produce la máxima ganancia, por lo que buscar el mayor

rendimiento por esta superficie no reditúa, necesariamente, el máximo beneficio económico que buscaría todo productor racional que produce maíz para vender en el mercado. En el caso de productores pequeños, que sólo cuenten con pocos recursos para comprar 424 kg de F, deben aplicar este nutriente en ½ ha y obtendrían una ganancia por peso gastado en F de \$1.12.

Cuadro 6. Variables analizadas.

Fertilizante aplicado (F: kg ha ⁻¹)	Rendimiento (Y: kg ha ⁻¹)	Ingreso		Costo Variable de F \$ (CVF = Pf*F)	Costo	Ganancia
		Ingreso total en \$ (IT= Pm*Y)	marginal en \$ (IMg = ΔIT/ΔY)		marginal en \$ (CMg = CVF/ΔY)	o beneficio en \$ (π = IT – C)
846	10346	51728.01	-	9729.00	-	25226.01
847	10348	51739.52	11.51	9740.50	11.50	25226.02
848	10350	51751.02	11.50	9752.00	11.50	25226.02
849	10353	51762.51	11.49	9763.50	11.50	25226.01
1892	11551	57757.15	0.00	21758.00	11.50	19226.15
1893	11551	57757.15	0.01	21769.50	11.50	19214.65
1984	11551	57757.15	-0.01	21781.00	11.50	19203.15

Nota: $\partial Y/\partial l$ es la derivada parcial de Y con respecto a F. \$: Peso. Pm: Precio de maíz = 5.00 \$/kg. Pf: Precio de la fórmula de fertilizante = 11.50 \$/kg. CVF: Costo variable del fertilizante. Δ: Es el cambio o variación. C = CVF + CF, donde CF: Costo fijo = \$ 16, 773.00.

Fuente: Elaboración propia con base en información del experimento.

Si se consideran todos los costos en que incurre el productor al aplicar fertilizante al cultivo de maíz, incluyendo los costos de la cosecha y beneficiado del grano,

se debe calcular la relación de precio relevante usada en la evaluación económica con la Ecuación 14:

$$r = [(P_{vf} + t) / c + I] (1 + R) / (P_{vo} - C_y) (1 - a) = [(11.50 + 0.15) / 1 + 0.90] (1 + 0.1225) / (5.00 - 0.15) (1 - 0.10) = 3.2016.$$

Donde: P_n = precio de campo del nutriente = $[(P_{vf} + t)/c] + I$; P_{vf} = precio de venta del fertilizante (\$11.50 kg^{-1}), t = costo de transportar a la parcela cada unidad de fertilizante (\$ 0.15 kg^{-1}), I = costo de aplicar cada unidad de nutriente (\$0.90 kg^{-1}) y c = la composición nutritiva del fertilizante (1 kg de F por cada kilogramo de la fórmula balanceada). R es la tasa mínima de retorno aceptada por los agricultores en la región (TIIE + 8 puntos = 12.25%). P_{vo} , el precio de venta del producto (\$5.00 kg^{-1}) y, C_y , la suma de los costos de cosecha, desgrane, cribado y encostado del maíz que son proporcionales al rendimiento (\$0.15 kg^{-1}).

Con la Ecuación 15 se calcula la cantidad óptima de F de la siguiente manera:

$$F^* = (r - b_1) / 2 b_2 = (3.2016 - 4.1646) / 2 \times (- 0.0011) = 437.7273 \text{ kg ha}^{-1}.$$

Donde: $b_1 = 4.1646$ es el valor del parámetro del término lineal y $b_2 = -0.0011$ es valor del coeficiente del término cuadrático de la función de producción estimada. Debe notarse que tomando en cuenta todos los costos en los que incurre el productor al aplicar fertilizante la cantidad óptima se redujo en 410 kg (48%) de 848 a 438 kg ha^{-1} .

Con base en la Ecuación 13 se calculan los beneficios brutos de campo (BBC):

$$\text{BBC} = Y (1 - a) P_0 = Y (1 - a) (P_{vo} - C_y) = 10,350.2034 (1 - 0.1) (5.00 - 0.15) = \$ 45,178.6378 \text{ ha}^{-1}.$$

donde Y es el rendimiento experimental (10,350.2034 kg ha^{-1}); a es el ajuste a la baja (10% considera el CIMMYT) por el menor rendimiento que obtienen los agricultores en comparación con el obtenido en los experimentos por los investigadores en los campos de los agricultores; P_0 es el precio de campo del producto, que es igual a la diferencia entre P_{vo} , el precio de venta del producto (\$5.00 kg^{-1}) y, C_y , la suma de los costos de cosecha y beneficiado del grano

proporcionales al rendimiento ($\$0.15 \text{ kg}^{-1}$). De manera similar se podría estimar los BBC para el rastrojo de maíz, pero no se obtuvo información del rendimiento de este subproducto para estimar una función de respuesta; además de que los costos y beneficios implícitos de esta actividad, no se consideraron por ser poco significativos. Quizás aporte mayores beneficios incorporar estos esquilmos al suelo para incrementar el contenido de materia orgánica y mejorar la porosidad, aeración, infiltración de agua y contenido de humedad.

Para calcular el aumento mínimo requerido de rendimiento de maíz, ΔY , que el agricultor necesita para agregar un kg de F se estima de la siguiente manera:

$$\Delta Y = \Delta \text{TCV} (1 + R) / P_0 = 12.40 (1 + 0.1225) / 4.85 = 2.8699 \text{ kg.}$$

Donde: ΔTCV es el cambio del total de los costos que varían; es decir, el costo de un kg de fertilizante más la mano de obra para aplicarlo ($\$12.40$), el precio de campo de maíz ($\$4.85 \text{ kg}^{-1}$) y R la tasa de retorno mínima (12.25%). Este resultado implica que el productor requiere de 2.87 kg de maíz para comprar y aplicar un kg más de fertilizante.

5.5.2 Conclusiones

Con base en el análisis de varianza se concluye que al menos un tratamiento (dosis de fertilización) es diferente a los demás (genera un rendimiento promedio diferente a los demás). De acuerdo con la técnica de contrastes no hay diferencia estadísticamente significativa entre los rendimientos promedio de los tratamientos de fertilizante de 400 y 600 kg ha^{-1} . Asimismo, se concluye que si hay diferencia entre el rendimiento promedio del tratamiento T0 (testigo: 0 kg ha^{-1}) y el promedio en los tratamientos T2 y T3 (600 y 1,200 kg ha^{-1} , respectivamente) con evidencia a favor de este último promedio mayor.

En el caso del método de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) se puede señalar con un nivel de confianza del 5% que los tratamientos 1800 y 600; 1800 y 0; 1200 y 0; 400 y 0, son diferentes en sus efectos. Mientras que con los métodos de Tukey y de Bonferroni solamente los tratamientos 1800 y 0, 1200 y 0 tienen diferencias significativas del 5%. En el procedimiento de Scheffé

únicamente el tratamiento 1800 y 0 es diferente significativamente en sus efectos.

La función de producción cuadrática de maíz blanco estimada permite obtener la dosis óptima económica o de máxima ganancia de F (848 kg ha⁻¹) y la dosis óptima técnica o de máximo rendimiento (1893 kg ha⁻¹). Los resultados obtenidos pueden servir de criterio económico para la toma de decisiones de producción de agricultores pequeños de maíz blanco, que cuentan con menos recursos para comprar el fertilizante, por lo que podrían aplicar sólo 424 kg de F en ½ ha y así obtener la máxima ganancia neta por peso gastado en F; como de productores medianos y grandes, que disponen de más recursos para adquirir la cantidad de F que les permita alcanzar la máxima ganancia.

Al considerar todos los costos en que incurre el productor cuando aplica fertilizante al cultivo de maíz, incluyendo los costos de la cosecha, beneficiado del grano, haciendo un ajuste a la baja de 10% en el rendimiento del productor con respecto al rendimiento experimental y considerando una tasa mínima de retorno esperada por el agricultor, la dosis óptima de fertilizante se reduce en 48% a 438 kg ha⁻¹. Aún con ello los beneficios brutos de campo se acercan a los 45 mil pesos por hectárea y el productor requiere de 2.48 kg de maíz para adquirir un kg de fertilizante.

Se recomienda que en futuras investigaciones se amplíe la región por explorar, de tal manera que, el tamaño permita observar el tipo de respuesta clásico. También es conveniente explorar un diseño experimental de bloques al azar.

5.5.3 Literatura citada

Aguilar-Carpio, C. *et al.* 2015. Rendimiento y rentabilidad de maíz en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno, en clima cálido. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18 (2015): 151 – 163 pp.

Beattie, B. R., and Taylor C. R. 1993. *The Economics of Production*. Reprint edition. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, USA.

Byerlee, D., and L. Harrington. 1981. *Deriving Optimum Fertilizer Levels: The Naive Economist versus the Practical Farmer*. CIMMYT Economics Training Note. México, D.F.: CIMMYT.

Castellanos-Pérez, M., Martínez-Garza, A., Beatriz-Colmenares, C., Martínez-Damián, M. A. y Rendón-Sánchez, G. 2006. Región confidencial para el óptimo económico de una función de producción Cobb-Douglas. *Agrociencia* 40: 117-124.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1988. *La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica*. Edición completamente revisada. México D.F., México: CIMMYT.

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2020). *Maíces*: Autor. Consultado el 15-09-2020.

<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/evolucion-bajo-domesticacion>

Consultado 15/09/2020.

Infante, G. S. y Zárate, L. G. 2010. *Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario*. Reimpresión 2010. Ed. Trillas. México, D. F.

Jauregui, M.A., and G.E. Sain. 1992. Continuous Economic Analysis of Crop Response to Fertilizer in On-Farm Research. CIMMYT Economics Paper No.3. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Kato, Y. T.A. *et al.*, 2009. Origen y clasificación del maíz: Una revisión analítica. Editorial Impresora Apolo. México, D.F. México.

Martínez, G. A. 1972. *Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos*. CP. Chapingo, Méx.

Martínez, G. A. 1982. *Métodos econométricos*. CP. Chapingo, México.

Martínez-Gutiérrez, A. *et al.* 2018. Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias*

Agrícolas, volumen (9), número 7. 28 de septiembre - 11 de noviembre, 2018. México.

Nicholson, W. 2002. *Microeconomics Theory: Basic principles and extensions*. Eighth Edition. Thomson Learning, Inc, USA.

Portillo, V. Marcos. 2015. *La Función de Producción Cúbica, su aplicación en la agricultura*. UACH, México.

Rasmussen, N. 2103. *Production Economics. The Basic Theory of Production Optimization*. Second Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Ger.

SAGARPA. 2012. *Memoria Documental del Programa "Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional" 2010-2012*: Autor.

SAGARPA-SIAP. 2018. *Atlas Agroalimentario 2019*: Autor.

Steel, R. y Torrie, J. 1985. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. Primera edición en español. Traductor Martínez, B. R. Mc Grow-Hill. Bogotá, Colombia. Segunda edición.

Stone, K. C. *et al.* 2010. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer and Irrigation in the Southeastern Coastal Plain. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542. Vol. 26(3): 429-438.

Swanson, *et al.* 1973. Economically Optimal levels of Nitrogen Fertilizer for Corn: an Analysis Based on Experimental Data, 1966-1971. Illinois Agricultural Economics, Vol. (13), No. 2 (julio de 1973): 16-25. DOI: 10.2307 / 1348945.

Wellhausen, E. J. *et al.* 1951. Las razas de Maíz en México, su origen y distribución. Imprenta "Aldina". Ciudad de México. México.

Zamudio, G. B. *et al.* 2015. Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, volumen (9), número 6. 14 de agosto - 27 de septiembre, 2018.

6. Anexos

Programa del paquete System Analisis Statistical para estimar el ANOVA, las pruebas de medias, la función de producción cuadrática y otros modelos.

```
OPTIONS LS=80 PS=66 NODATE;
DATA FERT;
INPUT FTE RENDF RFTE REND C;
FT2=FTE*FTE;
FT3=FT2*FTE;
LREND=LOG (REND);
LFTE=LOG (FTE); LRFTE=LOG (RFTE); LFT2=LOG (FTE)*LOG (FTE);
LFT3=LOG (FTE)*LOG (FTE)*LOG (FTE);
CARDS;
0      10.18 0      9031      0
0      10.70 0      10228     0
0      11.36 0      9691      0
0      11.56 0      7640      0
400    12.28 20     11574     0
400    13.22 20     10625     0
400    13.66 20     10715     0
400    14.96 20     10171     0
600    10.45 24     11595     0
600    13.12 24     10239     0
600    13.26 24     10284     1
600    15.10 24     8699      1
1200   10.78 35     10244     1
1200   12.44 35     12245     1
1200   13.51 35     11311     1
1200   13.75 35     11150     1
1800   13.30 42     10848     1
1800   13.48 42     11606     1
1800   13.87 42     11608     1
1800   14.46 42     12336     1
;
/* print the data */
PROC PRINT DATA=FERT;
RUN;
QUIT;

PROC GLM;
  CLASS FTE;
  MODEL REND=FTE;
  MEANS FTE/ CLDIFF BON TUKEY SCHEFFE LSD DUNNETT;
  CONTRAST 'PHI1' FTE 1 0 1 -1 -1;
  ESTIMATE 'PHI1' FTE 1 0 1 -1 -1;
  CONTRAST 'PHI2' FTE 1 0 0 -1 0;
  ESTIMATE 'PHI2' FTE 1 0 0 -1 0;
```

```

RUN;
QUIT;
TITLE1 'REND VS. PERCENTAGE'; SYMBOL1 V=CIRCLE I=NONE;
PROC GPLOT DATA=FERT; PLOT REND*FTE/FRAME; RUN; QUIT;
PROC GLM;
CLASS FTE;
MODEL REND=FTE;
OUTPUT OUT=DIAG R=RES P=PRED;
RUN;
QUIT;
PROC SORT DATA=DIAG;
BY PRED;
RUN;
QUIT;
TITLE1 'RESIDUAL PLOT';
SYMBOL1 V=CIRCLE I=SM50;
PROC GPLOT DATA=DIAG;
PLOT RES*PRED/FRAME;
RUN;
QUIT;
PROC UNIVARIATE DATA=DIAG NORMAL;
VAR RES;
TITLE1 'QQ-PLOT OF RESIDUALS';
QQPLOT RES/NORMAL (L=1 MU=EST SIGMA=EST);
RUN;
QUIT;
ODS GRAPHICS ON;
TITLE "Post Hoc Pairwise Comparison";
PROC GLM DATA=FERT;
CLASS FTE;
MODEL REND=FTE;
LSMEANS FTE / PDIFF=ALL ADJUST=TUKEY;
LSMEANS FTE / PDIFF=CONTROL ("Bordeline") ADJUST=DUNNETT;
RUN;
QUIT;
ODS GRAPHICS OFF;
PROC PLOT;
PLOT REND*FTE=!*;
PROC GLM;
MODEL REND=FTE FT2 C;
PROC GLM;
MODEL REND=FTE FT2;
PROC GLM;
MODEL REND=FTE C;
PROC GLM;
MODEL REND=FTE RFTE C;
PROC GLM;
MODEL LREND=LFTE FTE;
PROC GLM;

```

```

MODEL LREND=LFTE LFT2 LFT3 C;
RUN;
QUIT;

```

Datos de fertilizante, rendimiento y variable binaria usados en la estimación de la función cuadrática.

Sistema SAS

1

Obs	FTE	RENDF	RFTE	REND	C	FT2	FT3
1	0	10.18	0	9031	0	0	0
2	0	10.70	0	10228	0	0	0
3	0	11.36	0	9691	0	0	0
4	0	11.56	0	7640	0	0	0
5	400	12.28	20	11574	0	160000	64000000
6	400	13.22	20	10625	0	160000	64000000
7	400	13.66	20	10715	0	160000	64000000
8	400	14.96	20	10171	0	160000	64000000
9	600	10.45	24	11595	0	360000	216000000
10	600	13.12	24	10239	0	360000	216000000
11	600	13.26	24	10284	1	360000	216000000
12	600	15.10	24	8699	1	360000	216000000
13	1200	10.78	35	10244	1	1440000	1728000000
14	1200	12.44	35	12245	1	1440000	1728000000
15	1200	13.51	35	11311	1	1440000	1728000000
16	1200	13.75	35	11150	1	1440000	1728000000
17	1800	13.30	42	10848	1	3240000	5832000000
18	1800	13.48	42	11606	1	3240000	5832000000
19	1800	13.87	42	11608	1	3240000	5832000000
20	1800	14.46	42	12336	1	3240000	5832000000

Obs	LREND	LFTE	LRFTE	LFT2	LFT3
1	9.10842	.	.	.	.
2	9.23288	.	.	.	.
3	9.17895	.	.	.	.
4	8.94115	.	.	.	.
5	9.35652	5.99146	2.99573	35.8976	215.079
6	9.27096	5.99146	2.99573	35.8976	215.079
7	9.27940	5.99146	2.99573	35.8976	215.079
8	9.22730	5.99146	2.99573	35.8976	215.079
9	9.35833	6.39693	3.17805	40.9207	261.767
10	9.23396	6.39693	3.17805	40.9207	261.767
11	9.23834	6.39693	3.17805	40.9207	261.767
12	9.07096	6.39693	3.17805	40.9207	261.767
13	9.23445	7.09008	3.55535	50.2692	356.412
14	9.41287	7.09008	3.55535	50.2692	356.412
15	9.33353	7.09008	3.55535	50.2692	356.412
16	9.31919	7.09008	3.55535	50.2692	356.412
17	9.29174	7.49554	3.73767	56.1831	421.123
18	9.35928	7.49554	3.73767	56.1831	421.123
19	9.35945	7.49554	3.73767	56.1831	421.123
20	9.42028	7.49554	3.73767	56.1831	421.123

Resultados de la regresión de la función de producción cuadrática.

Procedimiento GLM

Variable dependiente: REND

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	16304439.15	5434813.05	8.20	0.0016
Error	16	10606958.85	662934.93		
Total correcto	19	26911398.00			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	REND Media
0.605856	7.687011	814.2082	10592.00

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
FTE	1	11782114.25	11782114.25	17.77	0.0007
FT2	1	1072545.60	1072545.60	1.62	0.2216
C	1	3449779.30	3449779.30	5.20	0.0366

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
FTE	1	7011983.790	7011983.790	10.58	0.0050
FT2	1	2294891.468	2294891.468	3.46	0.0813
C	1	3449779.305	3449779.305	5.20	0.0366

Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t	Pr > |t|
Término in	9129.902327	386.7269654	23.61	<.0001
FTE	4.164552	1.2805109	3.25	0.0050
FT2	-0.001067	0.0005733	-1.86	0.0813
C	-1520.265162	666.4370570	-2.28	0.0366