

Análisis de fertilización en el agroecosistema maíz en la cuenca de Papaloapan

Roberto de Jesús López Escudero¹
Gustavo López Romero¹
Verónica Lango Reynoso¹
Héctor Daniel Inurreta Aguirre^{2,§}

1 Campus Veracruz-Colegio de Postgraduados. Carretera Xalapa-Veracruz km 88.5, Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. CP. 91690. Tel. 229 2010770, ext. 6430. (lopez.roberto@colpos.mx; gustavolr@colpos.mx; lango.veronica@colpos.mx).

2 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Toluca-Zitácuaro km 4.5. Vialidad Adolfo López Mateos, Col. Los Ángeles, Zinacantepec, Estado de México. CP. 51350.

Autor para correspondencia: inurreta.hector@inifap.gob.mx

Resumen

El maíz es el principal cultivo de la canasta básica en México, así como uno de los productos de mayor importancia comercial y económica a nivel nacional. Dentro de los principales factores del manejo agronómico que determinan su nivel de productividad se encuentra la fertilización. Actualmente derivado de los conflictos bélicos entre Rusia y Ucrania, existe un desabasto y por ende una elevación del precio de los fertilizantes. Por lo anterior, en este trabajo se analizó el factor de fertilización en la cuenca del Papaloapan para analizar el efecto que ejerce la nutrición química en el cultivo de maíz en función de su productividad en $t\ ha^{-1}$ de grano. Se simuló tres escenarios de fertilización con el uso del modelo SWAT y se mapearon los resultados de los factores analizando estadísticamente la diferencia de medias de los tratamientos por medio de una Anova la cual arrojó un valor de $P= 2e-16$ mostrando diferencia significativa en los efectos de los factores analizados sobre el rendimiento del cultivo. En conclusión, el factor de fertilización fue superior al de no fertilización con una diferencia entre medias de $7.8\ t\ ha^{-1}$ de grano, lo cual indica que la ausencia de la labor de fertilización del cultivo impacta negativamente sobre la productividad de grano de maíz. Sin embargo, se encontró que la eficiencia entre media dosis y dosis completa de fertilización nitrogenada en términos de rendimiento es similar, siendo el factor de media dosis más eficiente que el anterior.

Palabras clave:

estudio, fertilización, grano de maíz, SWAT.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

Según el SIAP (2022), la producción de maíz en México ha aumentado desde 2006, alcanzando 27.5 millones de toneladas entre el 2020 y 2021. Este cultivo representa más de 60% de las calorías de los sectores más pobres de la población (Bourges, 2013). A pesar de que México es uno de los principales productores (ASERCA, 2018), también importa 34.12% del maíz que consume, el segundo más alto en el ranking de importadores (FIRA, 2016).

El maíz es el alimento básico de México y su producción es vital para la seguridad alimentaria de la nación (Ureta *et al.*, 2020). México también es uno de los mayores reservorios de diversidad genética de maíz, albergando aproximadamente 50% de la diversidad genética conocida en el continente americano (Vigouroux *et al.*, 2008). Cualquier desajuste en el desarrollo y producción de los agroecosistemas de maíz podría poner en riesgo esta diversidad genética.

Uno de los factores de relevancia en el manejo agronómico del cultivo de maíz es la fertilización. La fertilización del suelo con nitrógeno (N) es prioritaria para la producción rentable del cultivo, seguida por el uso de fósforo (P) y potasio (K). Una dosis equilibrada de NPK tiene una gran influencia en el crecimiento y rendimiento del cultivo (Garbanzo *et al.*, 2021).

Según la CEPAL (2022), conflictos bélicos transnacionales como el actual entre Ucrania y Rusia están afectando la economía y el comercio mundial, incluyendo a América Latina. Entre las repercusiones en el comercio de insumos, los fertilizantes son uno de los productos más afectados, ya que México y otras naciones de América Latina importan 88% de los fertilizantes agrícolas de Rusia.

Aunque los precios de fertilizantes nitrogenados ya van a la baja, aún se mantienen en niveles históricamente elevados y se espera que su uso disminuya en campo por cuestiones de asequibilidad y disponibilidad, lo que afectaría negativamente la producción de grano a nivel nacional y la seguridad alimentaria (CEPAL, 2022). En México, según Bada-Carbajal *et al.* (2021), la cuenca del Papaloapan es una de las principales regiones productoras de maíz, con municipios como San Andrés Tuxtla o José Azueta con altos rendimientos de grano por hectárea y un impacto negativo en el proceso de fertilización del cultivo afectaría enormemente ciertos ámbitos socioeconómicos de la cuenca. Por lo anterior, en este trabajo se analizó el factor de fertilización en la Cuenca del Papaloapan para analizar el efecto que ejerce la nutrición química en el cultivo de maíz en función de su productividad en $t\ ha^{-1}$ de grano.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del Papaloapan se encuentra en la vertiente sur del Golfo de México (Figura 1). Abarca territorios de los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz con un área de 46 263 km^2 , representa 2.36% del territorio nacional y es la segunda región más importante del país por su volumen de escurrimiento, estimado en 46 000 millones de m^3 al año (Murillo y López, 2005).



Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Papaloapan.



Análisis de uso de fertilizantes en el cultivo de maíz

Se implementó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch *et al.*, 2009) para calcular el potencial productivo de maíz en la Cuenca del Papaloapan. Se compararon tres escenarios: a) uno con manejo agronómico de fertilización recomendada (Tinoco, 2019); b) media dosis de fertilización; y c) falta de fertilización en condiciones de temporal. La simulación abarcó el período 2016-2021 y consideró tres variables de análisis: fertilización óptima, media dosis de fertilización y sin aplicaciones de fertilizantes.

Delineación de las subcuencas dentro de la cuenca del Papaloapan

El SWAT trabaja a nivel de cuenca y subcuenca. El modelo subdivide la cuenca en subcuencas, basándose en la topografía del área de estudio (Akhavan *et al.*, 2010; Garg *et al.*, 2011). Para el presente trabajo se tomó el total del área de la Cuenca del Papaloapan. Mediante un modelo de elevación digital (DEM) con píxel 90 x 90 adquirido de (INEGI) se procedió a la generación de subcuencas. La generación de flujos acumulados y la red de escurrimientos se formó con base a el DEM y un mapa de ríos. La delineación de las subcuencas se realizó seleccionando todas las salidas de la red de flujos generada por el modelo. Para este proceso se generaron un total de 168 subcuencas para el total del área de estudio.

Generación de las unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Se subdividieron las subcuencas en unidades de respuesta hidrológica (HRU) basadas en el tipo de suelo, uso de suelo y pendiente (Akhavan *et al.*, 2010; Garg *et al.*, 2011). Utilizando un mapa edafológico de INEGI (2015) en formato vector (escala 1:250 000), se generaron las HRU dentro de la cuenca. La base de datos utilizada en el estudio consistió en 4 418 perfiles de suelos clasificados según el sistema WRB (INEGI, 2015). Estos datos proporcionaron información sobre las características ambientales, análisis físicos y químicos de 14 349 horizontes de suelo, así como detalles morfológicos y limitaciones para el uso y manejo del suelo (Paz-Pellat, 2018).

A partir de la capa vectorial de suelos y su tabla de atributos, se unificaron 340 tipos de suelo según la clasificación WRB para el área de estudio, considerando la primera subdivisión y sus horizontes. Para evaluar el uso de suelo, se creó una máscara en formato ráster que simuló el rendimiento potencial del cultivo de maíz en toda la superficie, asumiendo que el área de la cuenca se destinaba a uso agrícola en este estudio.

Para la generación de los rangos de pendiente se generaron cinco categorías (0-3, 3-8, 8-15, 15-30 y >30%) con base al modelo de elevación digital. Al final del proceso el modelo generó 4 852 HRU. En el Cuadro 1, se muestra a modo de ejemplo el perfil típico del suelo Vertisol-máxico-esquelético (VRmzsk) con los parámetros que requiere el modelo, así como la fuente de su obtención.

Cuadro 1. Características del perfil típico del suelo Vertisol-máxico-esquelético.

Horizonte	Prof (mm)	Tex (%)	DA (g cm ⁻³)	HD (mm mm ⁻¹)	CO (%)	CHS (mm hr ⁻¹)	CR (%)	Alb	USLE K	CE (dS m ⁻¹)
A	130	14-14-72	1.48	0.15	1.5	0.08	0	0.21	0.5	2
B1	440	32-14-54	1.56	0.15	0.3	0.1	0	0.21	0.25	2
B2	830	36-14-50	1.54	0.15	0.2	0.11	0	0.21	0.25	2

Prof= profundidad (INEGI, 2015); Tex= textura en el siguiente orden arcilla limón arena (INEGI, 2015); DA= densidad aparente (Saxton *et al.*, 1986); HD= humedad disponible (Saxton *et al.*, 1986), CO= carbono orgánico (Neitsch *et al.*, 2009); CHS= conductividad hidráulica saturada (Saxton *et al.*, 1986); CR= contenido de rocas (INEGI, 2015); Alb= albedo adimensional (ecuación de Harris, software curve expert 2.0) USLE K= factor 'K' de la ecuación universal de pérdida de suelo (Neitsch *et al.*, 2009); CE= conductividad eléctrica (INEGI, 2015).

Generación y asignación del clima

Se utilizaron datos históricos de 1074 estaciones climáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicadas en el trópico húmedo. Estos datos abarcan al menos 100 años de registros de precipitación, temperatura máxima y mínima en el periodo 1912-2020. Utilizando el generador climático EPIC (Sharpley y Williams, 1990), se generaron las estadísticas climáticas requeridas por el modelo y los datos diarios de temperatura y precipitación para el periodo completo de 1950 a 2020.

Las variables climáticas consideradas son las siguientes: a) temperatura máxima; b) temperatura mínima; c) desviación estándar de la temperatura máxima; d) desviación estándar de la temperatura mínima; e) precipitación pluvial promedio mensual; f) desviación estándar de la precipitación pluvial promedio mensual; g) coeficiente de asimetría de la precipitación pluvial promedio mensual; h) probabilidad de un día húmedo después de un día seco; i) probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo; j) promedio de días con precipitación pluvial al mes; k) precipitación pluvial máxima en media hora; y l) radiación solar. Para el total de la superficie de la cuenca de Papaloapan el modelo selecciono 128 estaciones meteorológicas con base a la proximidad al centroide de las subcuencas generadas.

Introducción de parámetros fisiológicos y manejo

Para el cálculo del potencial productivo de cultivos, el modelo requiere los parámetros fisiológicos de la especie a simular. SWAT contiene una base de datos con parámetros fisiológicos de diversos cultivos, dentro de la cual, de acuerdo con Neitsch *et al.* (2011) se introdujeron los correspondientes al cultivo maíz. En el Cuadro 2 se muestra a modo de ejemplo los parámetros fisiológicos introducidos al modelo.



Cuadro 2. Parámetros fisiológicos de maíz introducidos al SWAT.

Especie	RUE (kg ha ⁻¹ /Mj m ⁻²)	2 ^a point RUE	LAI	HI	Altura del dosel (m)	Profundidad de raíz (m)	Temperatura optima (°C)	Temperatura base (°C)
Maíz	39	45	6	0.5	2.5	2	25	8

RUE= eficiencia en el uso de la radiación; LAI= índice de área foliar; HI= índice de cosecha.

Para calcular el rendimiento del cultivo, se introdujo al modelo un manejo, incluyendo fechas de siembra y cosecha, dosis de fertilización y labores culturales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Manejo óptimo del cultivo de maíz introducido al modelo bajo condiciones de temporal.

Actividad	Año	Operación	Insumo o actividad	Fecha
Preparación del suelo	1	Chapeo	Blade	14 mayo
	1	Subsoleo	Disk Plow	24 mayo
	1	Rastreo	Finishing Harrow	29 mayo
	1	Rastreo	Finishing Harrow	30 mayo
	1	Surcado	Furrow Diker	31 mayo
Establecimiento del cultivo	1	Siembra	maíz	1 junio
Fertilización	1	1 ^a Fertilización	60-00-00 NPK (kg ha ⁻¹)	1 junio
	1	2 ^a Fertilización	00-60-00 NPK (kg ha ⁻¹)	1 junio
	1	3 ^a Fertilización	60-00-60 NPK (kg ha ⁻¹)	27 junio
Cosecha	1	Cosecha	Operación de cosecha y matanza	28 septiembre

NPK= nitrógeno, fósforo, potasio (Tinoco, 2019).

Análisis de resultados

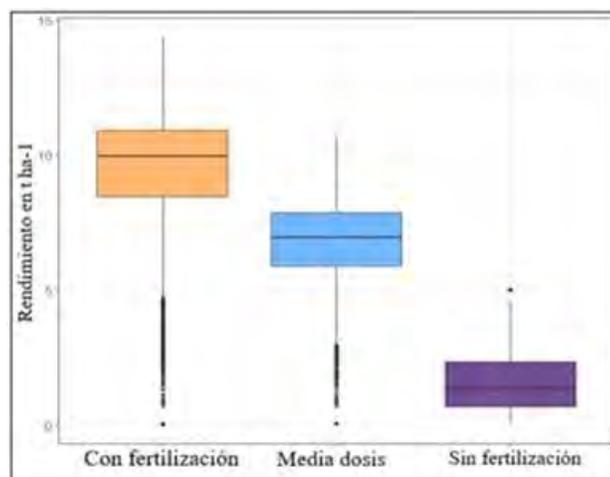
Utilizando sistemas de información geográfica, se realizó el mapeo del rendimiento potencial de maíz en la cuenca para tres escenarios: fertilización completa, media dosis de fertilización y sin fertilización. Se empleó el análisis estadístico de diferencia de medias en R[®], (R Core Team, 2021) con el método de Anova de Fischer (Cayuela, 2010) para evaluar la significancia y aceptar o rechazar la hipótesis nula de igual rendimiento de maíz en los tres escenarios simulados.

Resultados y discusión

En la Figura 2 se puede observar, mediante un gráfico de caja, la diferencia de medias entre los factores analizados para el rendimiento simulado del cultivo de maíz en la cuenca del Papaloapan. Se utilizó el método de análisis de varianza (Anova) de Fischer (Cayuela, 2010) para hallar el valor de significancia y determinar si existía diferencia significativa entre los factores analizados. El valor de P obtenido fue de 2e-16, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula y se demuestra que existe una gran diferencia significativa entre los factores analizados en función del rendimiento simulado del cultivo de maíz en la cuenca del Papaloapan.



Figura 2. Diferencia de medias de rendimiento del cultivo de maíz bajo diversos efectos de fertilización.



En el Cuadro 4 se presentan las estadísticas básicas comparativas de los escenarios simulados (con fertilización, media dosis de fertilización y sin fertilización) donde se observa las diferencias significativas de los tres factores de analizados.

Cuadro 4. Estadísticas básicas de análisis del efecto de fertilización en el cultivo de maíz en la cuenca del Papaloapan.

Factor	Media (t ha ⁻¹)	Mínimo (t ha ⁻¹)	Máximo (t ha ⁻¹)
Con fertilización	9.4	0.04	14.37
Media dosis de fertilización	6.75	0.05	10.7
Sin fertilización	1.6	0.05 ¹	5.2

La distribución espacialmente explícita de los efectos de los factores analizados sobre el cultivo de maíz en la cuenca se muestran en la Figura 3, del cultivo de maíz con fertilización (Figura 4), cultivo de maíz bajo efecto de dosis media de fertilización y Figura 5 del cultivo de maíz sin aplicación de fertilizantes.



Figura 3. Rendimiento del cultivo de maíz bajo un régimen completo de fertilización en la cuenca del Papaloapan.

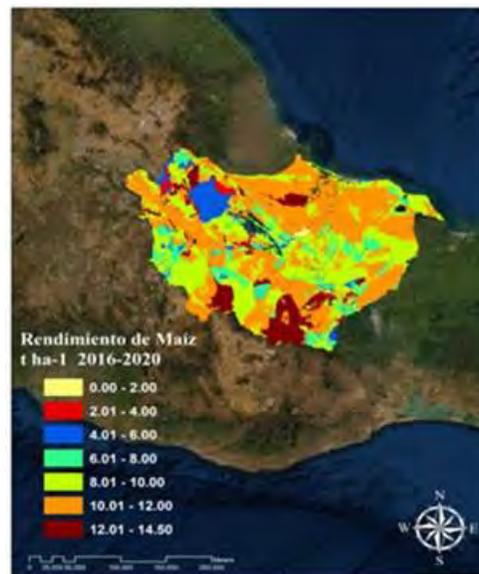


Figura 4. Rendimiento del cultivo de maíz sin aplicación de fertilizantes en la cuenca del Papaloapan.

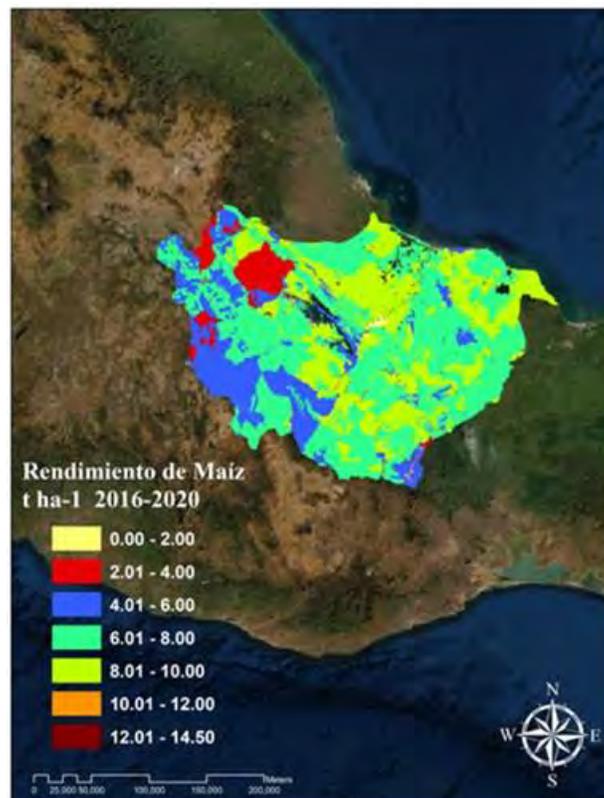
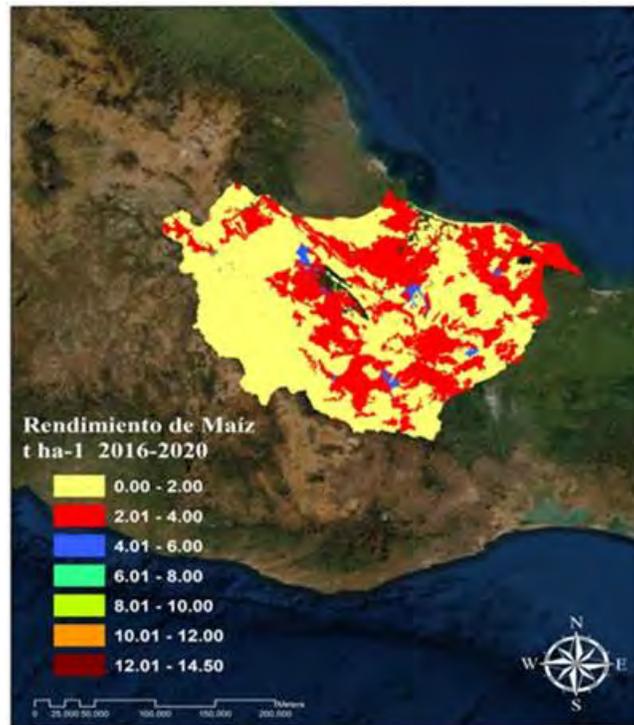


Figura 5. Rendimiento del cultivo de maíz sin aplicación de fertilizantes en la cuenca del Papaloapan.



Mediante el método de correlación de Pearson (Lalinde *et al.*, 2018) se validaron datos medidos en campo en función de los obtenidos por medio del proceso de simulación. En el Cuadro 5 se muestran los valores analizados.

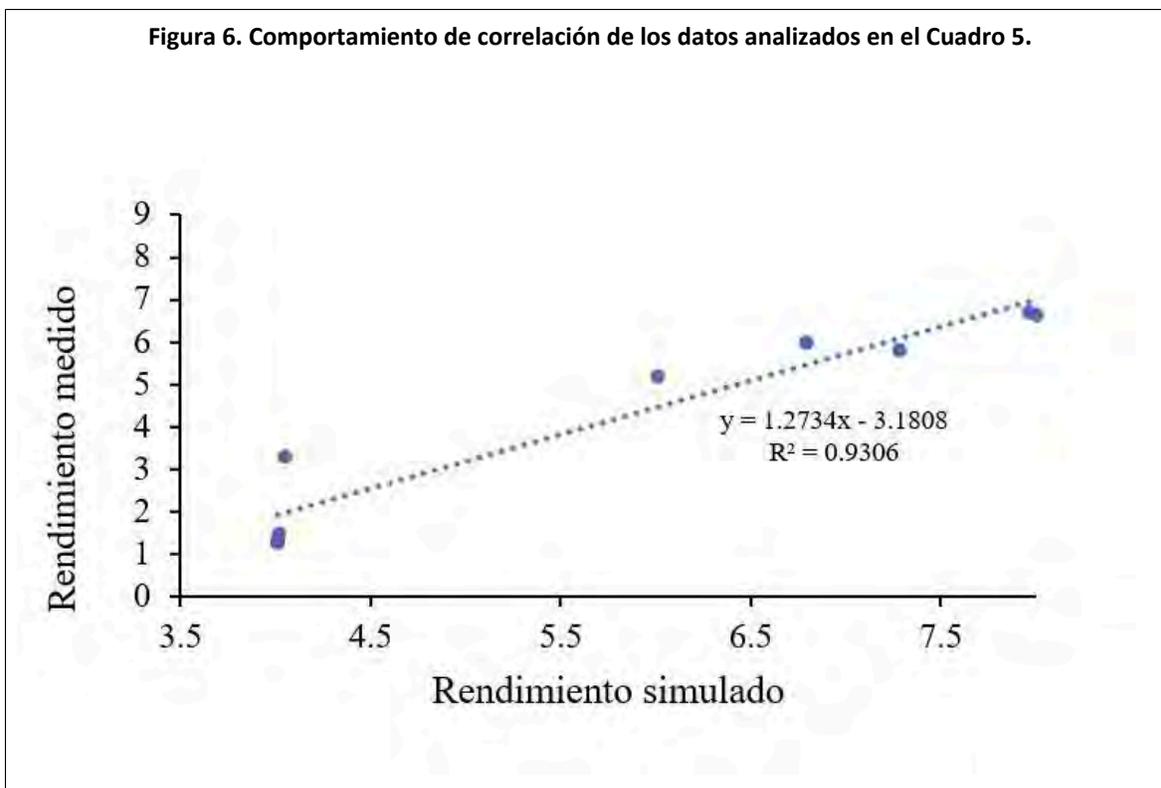
Cuadro 5. Análisis de correlación de datos medidos en campo en función de datos simulados por el modelo.

Localidad	HRU	Rendimiento simulado (t ha ⁻¹)	Rendimiento medido (t ha ⁻¹)
*Ignacio de la Llave	1 219	8	6.65
*San Andres Tuxtla	2 457	7.96	6.69
Loma Bonita	3 702	6.79	5.99
*Tlalixcoyan	1 730	6.01	5.18
*Cotaxtla	1 285	8.5	7.74
*Mata de Agua	2 175	7.28	5.82
*Rodriguez Clara	3 819	4.05	3.3
*Sampedro Quilitongo	6 140	4.01	1.28
San Juan Bautista	6 153	4.02	1.48
Coixtlahuaca			
*Tepelmeme de Morelos	4 310	4.01	1.27

* = Sánchez *et al.* (2019); + = Sierra *et al.* (2008).

En la Figura 6 se puede observar el comportamiento del análisis de correlación de datos tomados en campo en contraste con los valores obtenidos por medio del proceso de simulación. El valor de R² obtenido muestra una alta correlación y por ende demuestra que el modelo SWAT (Neitsch *et al.*, 2009) simula con notable precisión el comportamiento del cultivo de maíz en la cuenca de Papaloapan.

Figura 6. Comportamiento de correlación de los datos analizados en el Cuadro 5.



En función de los resultados obtenidos, se puede apreciar que la aplicación de fertilizante en el cultivo de maíz de la cuenca del Papaloapan es crucial para la producción de grano, a su vez, se observó que la diferencia entre una dosis media de nitrógeno (60 kg ha^{-1}) y una dosis óptima (120 kg ha^{-1}) es solo de 3.67 t ha^{-1} . Con base a esto, se analizó la eficiencia del uso de nitrógeno en ambos escenarios. La eficiencia en el uso de nitrógeno se calculó de acuerdo con (Dobermann, 2005), con la siguiente fórmula: $\text{PFPN} = \text{YN}/\text{FN}$.

Donde: PFPN= eficiencia en el uso del nitrógeno; YN= rendimiento del cultivo bajo la aplicación de N (t ha^{-1}); FN= cantidad de N aplicado (kg ha^{-1}). Se encontró que la eficiencia en el uso del nitrógeno del escenario con media dosis de fertilización fue mayor que el de dosis completa. En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos en proporción al valor estadístico de media y valor máximo de los efectos evaluados.

Cuadro 6 .Eficiencia en el uso del nitrógeno bajo la aplicación de una dosis media y optima de nitrógeno en la cuenca del Papaloapan.

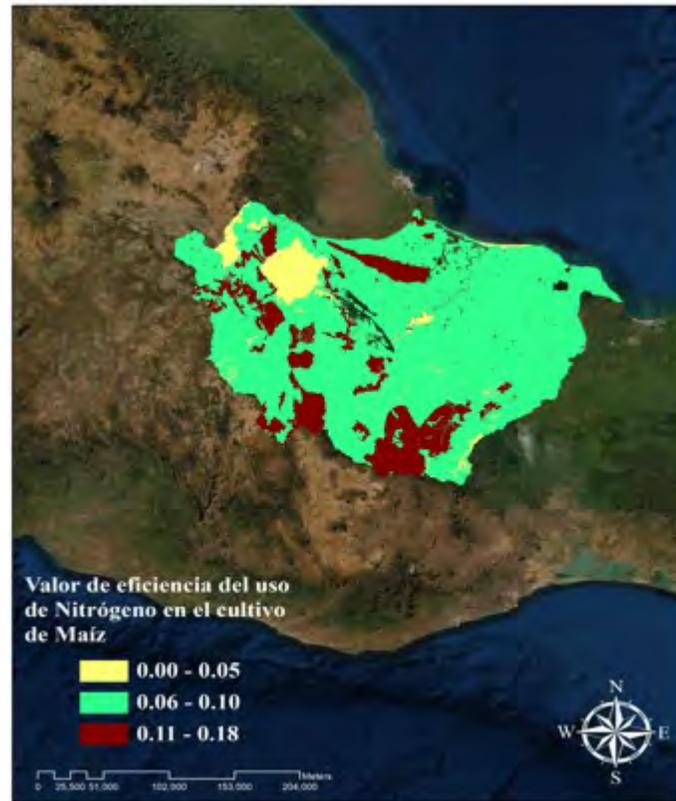
Factor FN	Media YN	Máximo YN	Valor de PFPN
Fertilización óptima (120 kg N ha^{-1})	9.4 t ha^{-1} de maíz	14.37 t ha^{-1} de maíz	PFPN (media)= 0.08 PFPN (máximo)= 0.12
Media dosis de fertilización (60 kg N ha^{-1})	6.75 t ha^{-1} de maíz	10.7 t ha^{-1} de maíz	PFPN (media)= 0.11 PFPN (máxima)= 0.18

La dosis óptima de fertilizante para el cultivo de maíz en la cuenca del Papaloapan resulta ser excesiva, según lo indicado por Capetillo *et al.* (2021). Aplicar una dosis media de fertilizante nitrogenado es suficiente para obtener rendimientos superiores a 10.7 t ha^{-1} , como se muestra en las Figuras 7 y 8. Esta práctica no solo tiene implicaciones en la relación beneficio-costo, sino que también contribuye a la sostenibilidad del agroecosistema al evitar procesos degradativos asociados al uso ineficiente de fertilizantes nitrogenados, como mencionado por Saynes-Santillán *et al.* (2019).

Figura 7. Valor de eficiencia de uso de nitrógeno (PPFN) en el cultivo de maíz bajo un efecto de dosis media de fertilización.



Figura 8. Valor de eficiencia de uso de nitrógeno (PPFN) en el cultivo de maíz bajo un efecto de dosis óptima de fertilización.



Conclusiones

La fertilización es crucial para el cultivo de maíz, ya que se observa una diferencia significativa en el rendimiento entre la fertilización y la no fertilización, con una media de 7.8 t ha^{-1} . Sin embargo, se ha encontrado un desperdicio en el uso de fertilizantes nitrogenados, ya que el rendimiento no varía tanto entre la dosis completa y la dosis reducida. Esto sugiere que una aplicación moderada de fertilizante podría ser suficiente para obtener buenos rendimientos, por encima de las 10.7 t ha^{-1} y ser más sostenible para el agroecosistema del maíz. Se requiere investigación adicional para mejorar el uso de fertilizantes nitrogenados mediante nuevas tecnologías y prácticas agronómicas.

Bibliografía

- 1 Akhavan, S.; Abedi, K. L.; Mousavi, S. F.; Afyuni, M.; Eslamianand, S. S. and Abba, P. K. C. 2010. Applications of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Ecosystems and Environment*. 139:675-688. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.10.015>.
- 2 ASERCA. 2018. Agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios. Maíz grano cultivo representativo de México. <https://www.gob.mx/aserca/articulos/maiz-grano-cultivo-representativo-de-mexico?idiom=es>.
- 3 Bada-Carbajal, L. M.; Osorio-Antonia, J. y Ramírez-Hernández, Z. 2021. Evolución de la producción del maíz en Veracruz, México. *Investigación Administrativa*. 50(128):12807. <https://doi.org/10.35426/iav50n128.07>.

- 4 Bourges, H. 2013. El maíz: su importancia en la alimentación de la población mexicana. *In*: Álvarez-Buylla, E. R.; Piñeyro-Nelson, A. Ed. El maíz en peligro ante los transgénicos: un análisis integral del caso de México. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)-UCCS, UV. 231-248 pp. <https://www.jstor.org/stable/43695257> .
- 5 Capetillo, B. A.; López, C. C. J.; Zetina, L. R.; Chávez, R.; Matilde, H. C.; Cadena, Z. M. y López, L. J. A. 2021. Modelo conceptual de fertilización nitrogenada para maíz (*Zea mays* L.) en Veracruz, Ciudad de México. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 7(14) <https://doi.org/10.5377/ribcc.v7i14.12606>.
- 6 Cayuela, L. 2010. Modelos lineales: regresión, Anova y Ancova. Eco Lab. Centro andaluz de medio ambiente. Universidad de Granada. Notas de clase. 1-57 p. <https://tauniversity.org/sites/default/files/modelos-lineales-regrsion-anova-y-ancova.pdf>.
- 7 CEPAL. 2022. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Efectos económicos y financieros en América Latina y el Caribe del conflicto entre la Federación de Rusia y Ucrania. Reflexiones de Alicia Bárcena. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Argentina. 10 p. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47831>.
- 8 Dobermann, A. R. 2005. Nitrogen use efficiency-state of the art. *Agronomy*, Faculty Publications. 316 p. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1319&context=agronomyfacpub> .
- 9 FIRA. 2016. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Panorama Agroalimentario. México, DF. <https://www.gob.mx/fira/documentos/panorama-agroalimentario>.
- 10 Garbanzo-León, G.; Alvarado-Hernández, A.; Vargas-Rojas, J. C.; Cabalceta-Aguilar, G and Vega-Villalobos, E. V. 2021. Nitrogen and potassium fertilization in corn in an Alfisol of Guanacaste, Costa Rica. *Costa Rica. Agronomía Mesoamericana*. 32(1):137-148. Doi:10.15517/am.v32i1.39822.
- 11 Garg, K. K.; Bharati, L.; Gaur, A.; George, B.; Acharya, S.; Jella, K. and Narasimhan, B. 2011. Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*. 61: 60-79 <https://doi.org/10.1002/ird.618>.
- 12 INEGI. 2015. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Guía para la interpretación de la Cartografía. Edafología WRB escala 1:250 000 serie III. México, DF. 60 p. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod-serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva-estruc/702825076221.pdf>.
- 13 Lalinde, J. D. H.; Castro, F. E.; Rodríguez, J. E.; Rangel, J. G. C.; Sierra, C. A. T.; Torrado, M. K. A. y Pirela, V. J. B. 2018. Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*. 37(5):587-595.
- 14 Murillo, L. M. y López, R. E. 2005. Organización social y producción en la cuenca del Río Papaloapan. *In*: Vargas, S. y Mollard, E. Ed. Problemas socioambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 245-275. <http://187.174.234.55/handle/20.500.12013/2113>.
- 15 Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. and Williams, J. R. 2011. Soil and water assessment Tool. Theoretical documentation version 2009. Backland Research Center. Texas. USA. 618 p. <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/128050/TR406-SoilandWaterAssesmenToolTheoreticalDocumentation.pdf?sequence=1>.
- 16 Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. and Williams, J. R. 2009. Soil and water Assessment Tool. Theoretical documentation. Backland research center. Texas, USA. 494 p. <https://swat.tamu.edu/mdia/99192/swat2009-theory.pdf>.

- 17 Paz-Pellat, F. 2018. Base de datos de perfiles de suelos en México. Elementos para Políticas Públicas. 2:210-235. <https://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/16>.
- 18 R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- 19 Sánchez-Hernández, M. A.; Jiménez-Maya, J. B.; Morales-Terán, G.; Acevedo-Gómez, R.; Antonio-Estrada, C. y Villanueva-Verduzco, C. 2019. Rendimiento de grano en maíces adaptados a condiciones de la baja cuenca del Papaloapan. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 22(1):519-529.
- 20 Saxton, K. E.; Rawls, W. J.; Romberger, J. S. and Papendick, R. I. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Trans. ASAE*. 50:1031-1035. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>.
- 21 Saynes-Santillán, V.; Turrent-Fernández, A. y Etchevers, J. D. 2019. Agricultura sustentable: el papel de la fertilización inteligente con nitrógeno y fósforo en México. *Elementos para Políticas Públicas* . 3(3):275-290. <https://elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/35>.
- 22 SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2022. Resumen de producción anual de maíz en México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- 23 Sharpley, A. N. and Williams, J. R. 1990. EPIC-erosion/productivity impact calculator. USDA. Agricultural research service. Technical Bulletin No. 1768. Washington, DC. EUA. 235 pp. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9551549>.
- 24 Sierra, M. M.; Palafox, C. A.; Rodríguez, M. F.; Espinosa, C. A.; Gómez, M. N.; Caballero, H. F. y Vázquez, C. G. 2008. H-520, híbrido trilineal de maíz para el trópico húmedo de México. *Agricultura Técnica en México*. 34(1):119-122. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S05682517200800010001>.
- 25 Tinoco, C. A. 2019. Tecnología de producción de maíz de temporal en el sur de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Cotaxtla. 17 p. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/723016/Maiz-temporal-tehuantepec.pdf> .
- 26 Ureta, C. 2020. Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural systems*. Elsevier. 177(12):102697-XX pp. Doi: 10.1016/j.agsy.2019.102697.
- 27 Vigouroux, Y. 2008. Population structure and genetic diversity of new world maize races assessed by DNA microsatellites. *American Journal of Botany*. 95(10):1240-1253. Doi: 10.3732/ajb.0800097 .



Análisis de fertilización en el agroecosistema maíz en la cuenca de Papaloapan

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 August 2023
Date accepted: 01 October 2023
Publication date: 12 December 2023
Publication date: November 2023
Volume: 14
Issue: 8
Electronic Location Identifier: e3378
DOI: 10.29312/remexca.v14i8.3378

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

estudio
fertilización
grano de maíz
SWAT

Counts

Figures: 8
Tables: 6
Equations: 0
References: 27
Pages: 0