

La importancia de los estudios de aptitud agrícola como herramientas de adaptación al cambio climático en el Estado de México



Resumen

La cartografía de la aptitud agrícola mediante sistemas de información geográfica permite hacer coincidir espacialmente las necesidades y/o limitaciones de los cultivos con las características agroclimáticas y edáficas del terreno para apoyar el desarrollo de sistemas de producción más eficientes. En la siguiente investigación se abordó el fenómeno de los estudios de aptitud de la tierra para la agricultura, las metodologías multicriterio y la modelación de cultivos mayormente aplicados, los cuales son cada vez más importantes para la planeación del territorio y el desarrollo agrícola. Para tal propósito se incorporó un ejercicio realizado con la aplicación del método de suma lineal ponderada para determinar áreas de aptitud para el maíz grano en el Estado de México. Se seleccionaron umbrales de variables agroclimáticas que permiten el desarrollo óptimo del cultivo. En este sentido se encontró que el Estado cuenta con una superficie de aptitud muy alta de 588, 879 has para un periodo base y de 585,435 has de superficie óptima con la aplicación del modelo MPI ESM LR con horizonte temporal 2045-2060. En este sentido se prevé una reducción de áreas óptimas para el cultivo de maíz grano el cual se verá afectado por la disponibilidad hídrica en el Estado de México.

Palabras clave: aptitud agrícola, sistemas de información geográfica, cambio climático, agricultura sostenible

Introducción

Durante la COVID-19 se mostró que en un contexto mundial de posiblemente 132 millones de personas, pasaron hambre en el 2020 a consecuencia de la recesión económica desencadenada por la pandemia. Por ello, entre las actividades económicas prioritarias destaca la provisión de alimentos, y entre ellas la agricultura. Por otra parte, las consecuencias del cambio climático (cc) suma a las preocupaciones a nivel mundial debido a las alteraciones atmosféricas que este causa; como el incremento de la temperatura, aumento de la frecuencia de inundaciones, sequías, ondas de calor, huracanes, heladas y granizadas así como un cambio en el régimen de precipitaciones (Sánchez et al., 2011). La variabilidad en el ciclo hidrológico tiene efectos en la disponibilidad del recurso hídrico para hacer funcionar los sistemas naturales y humanos, por lo que se vuelven más vulnerables a la variabilidad climática (IPCC, 2014).

Siendo así que, la agricultura es uno de los sectores productivos más afectados por el cambio climático pues este fenómeno impacta negativamente la producción (ciclo biológico de cada cultivo, temperatura, exposición solar y disponibilidad de agua para las plantas), los medios de vida de la población que depende de esta actividad, así como en la disminución de la disponibilidad de alimentos al destruir la producción, lo que llega a afectar en la nutrición de las personas (FAO, 2018). Así también, dañar las infraestructuras para el procesamiento de los alimentos, afectar los bienes e insumos requeridos y la capacidad productiva de los agricultores. Como consecuencia, se provoca inestabilidad en los precios de los alimentos, se desestabilizan los mercados, se origina un entorno que afecta a los sistemas de comercialización agrícola (Origel et al., 2020).

Actualmente, sobre la agricultura se ejerce la fuerte presión de producir más alimentos en los próximos 40 años, que los producidos en los últimos 10 000 años (Novozymes, 2015), así mismo, un tercio de la humanidad depende de pequeñas explotaciones agrícolas, representadas en 500 millones de pequeños agricultores, quienes tienden a negociar sus áreas por cultivos de exportación (Oxfam, 2013). En consecuencia, la tierra es objeto de competencia por la obtención de alimentos, lo

cual enfrenta a la humanidad, al reto de desarrollar formas estrategias de agricultura global y sostenible para producir alimentos con valor social y ambiental. La intención de esta investigación es relacionar o identificar las alternativas de mitigación que ofrecen los estudios de aptitud agrícola a la relación demanda de alimento y sostenibilidad como parte de la solución que se puede aportar desde el análisis espacial y geoinformática al reto de la política pública de la agricultura sostenible.

Por ende, en el presente trabajo, se hizo una revisión al estado del conocimiento sobre los estudios de aptitud de la tierra, para lo cual se identificaron con base en datos académicos, algunos de los trabajos que caracterizaron, evaluaron o diseñaron; se revisaron algunas definiciones y se discutió la relación entre sistemas, agricultura, aptitud de la tierra y cambio climático. Posteriormente, se analizó un ejercicio en donde se evaluó la aptitud de la tierra para el cultivo del maíz grano haciendo énfasis en la disponibilidad hídrica del Estado de México. Al final, se discutieron los resultados del análisis y las oportunidades de investigación en la materia.

Desarrollo

Estudios de aptitud de la tierra

La aptitud es la capacidad de desarrollar alguna actividad en específico en un mismo espacio geográfico, que obtienen ventajas de las condiciones geográficas y de sus interrelaciones con los elementos del espacio. Por lo que cada porción del territorio puede ser vista como un sistema, resultado de la interacción de factores geológicos, climáticos, geomorfológicos, edafológicos, hídricos, vegetación y fauna silvestre y el manejo de las comunidades. Las bases de los estudios de aptitud de la tierra se determinan a partir de una regionalización agroecológica lo que hace referencia a la división de la superficie de la tierra en unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su aptitud, con la producción potencial y con el impacto ambiental (FAO,1997).

El proceso de regionalización agroecológica consiste en determinar unidades homogéneas de acuerdo con uno o varios criterios o variables y cada uno de ellos

se representan en mapas e información geográfica utilizando modelos cartográficos. En este sentido, se trata de la delineación de manera cualitativa o cuantitativa de diferentes niveles de homogeneidad sobre el territorio (Mendoza et al., 2010). De acuerdo con Bocco (2019), las investigaciones de aptitud de la tierra operan con base en dos líneas de acción : a) en el uso de capas de información almacenadas en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica, las cuales se someten a procedimientos automatizados de agrupamiento de homogeneidades en un proceso multivariado y b) se basa en el uso de información preexistente, en niveles generales pero partiendo de una armonización de los sistemas categórico de las variables seleccionadas para describir las unidades derivadas de la regionalización. Sin embargo, la regionalización agroecológica no permite describir la aptitud del terreno para uno o varios usos posibles. No obstante esta se puede describir por la valoración de la oferta ambiental. En este sentido, el estudio de aptitud se trata del proceso de predecir el uso potencial del terreno sobre la base de sus atributos. La aptitud considera limitantes y restricciones físicas para desarrollar alguna actividad productiva en particular, como la agricultura. Por ello, el concepto de aptitud está vinculado con los conceptos de capacidad agroecológica uso potencial o vocacional de un terreno o porción de territorio.

Métodos multicriterio para la evaluación de idoneidad de la tierra

Hoy en día la base técnica-metodológica de las investigaciones de zonificaciones agroecológica, están compuestas por bases de datos vinculadas a un sistema de información geográfica (SIG) y relacionadas con modelos automatizados, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de la tierra. El objetivo del uso de los SIG es obtener resultados confiables para la toma de decisiones, a través del análisis e interpretación de gran cantidad de datos biofísicos, socioeconómicos, estadísticos en forma espacial y temporal, necesarios para generar información integrada en mapas y análisis estadístico (FAO, 1997).

En este sentido, el Análisis de Evaluación Multicriterio (EMC) es una alternativa metodológica que permite investigar un número de alternativas mediante múltiples

criterios la finalidad de auxiliar a los tomadores de decisiones a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas de uso (Malczewski, 1999). A continuación se presentan algunos de los ejemplos de métodos aplicados en los EMC.

Entre las técnicas más utilizadas son la función Fuzzy, la cual permite la estandarización de mapas (Ceballos y López, 2003). La teoría de los conjuntos difusos fue definida por primera vez por Zadeh (1965) para definir y determinar cuantitativamente algunas clases que se expresan sucesivamente por su grado de importancia. Los métodos convencionales se basan en decisiones dependientes de la experiencia entre expertos. Además, trata las unidades espaciales como los rangos de valores de atributos como cantidades exactamente específicas que ignoran la continuidad de la variación del suelo y el paisaje (Burrough et al., 1992; Van Ranst et al., 1996). Durante la fase de modelización bajo este método se realizan tres procesos: La fuzzificación, la inferencia de reglas difusas y la defuzzificación. La fuzzificación es el proceso mediante el cual los valores cuantitativos de los parámetros ambientales se convierten en variables lingüísticas de orden adecuado o no adecuado mediante funciones de pertenencia. Durante este proceso, todos los valores de los factores se asignan a una escala común (es decir, valores de 0 a 1) (Feng et al., 2017a). La determinación del valor de pertenencia de los factores ambientales se realiza con inferencia de reglas difusas (por ejemplo, uso de reglas condicionales IF-THEN) mientras que la defuzzificación convierte los valores de pertenencia en un índice de idoneidad (Feng et al., 2017b). La aplicación de lógica difusa en la modelización de la idoneidad de la tierra tiene la ventaja de una tolerancia definida por el usuario, tolerancia a los límites de la clase en forma de zona de transición (Burrough et al., 1992).

La principal limitación asociada al enfoque de lógica difusa para el análisis de la adecuación del uso del suelo es la falta de un método definido para determinar la función de pertenencia Tang, Van Ranstb, y R. G., 1997). Las funciones de pertenencia y las ponderaciones desempeñan un papel clave en el modelado difuso

del análisis de aptitud por que debido a estas es posible estandarizar la información espacial.

Por otro lado, el Análisis Jerárquico Analítico (AJA) es un método EMC propuesto por Saaty y Vargas, (2001) que descompone una tarea compleja en pares de criterios (opciones de decisión) por medio de una matriz de comparación por pares, en la que se comparan dos criterios a la vez. El AJA puede aplicarse de dos maneras distintas dentro del entorno del SIG: 1) deriva las ponderaciones asociadas con las capas cartográficas de idoneidad que luego pueden combinarse con las capas cartográficas de atributos mediante los métodos de combinación aditiva lineal (Romano et al., 2015). Este enfoque es de especial importancia para una tarea que implica un gran número de alternativas representadas mediante el modelo de datos rasterizados (información geográfica en celdas) cuando es imposible realizar una comparación por pares de las alternativas (Zolekar y Bhagat, 2015). 2). El AJA se ha utilizado ampliamente en una amplia gama de ámbitos, como la agricultura y la planificación del uso de la tierra. Básicamente, es un método que puede ser empleado para derivar pesos asociados con las capas cartográficas en mapas de aptitud o idoneidad. Los pesos pueden ser combinados con sumas ponderadas lineales.

La asignación de pesos para el análisis de aptitud de la tierra a través de AJA puede mejorarse en gran medida siguiendo un enfoque más robusto. Según Zhang et al., (2015) las incertidumbres en el modelo AJA pueden ajustarse mediante tres opciones: (1) en la situación de los datos no asistenciales, la matriz de pares debe derivarse basándose en el objetivo, datos científicos o estadísticos, (2) la importancia relativa de los factores estimados individualmente y basados en la opinión de más científicos.

Este procedimiento fue adoptado por (Zabihi et al., 2015) para el procedimiento de adecuación de tierras y para la planificación sostenible de los cítricos en el que 40 opiniones de expertos de la producción de cítricos y en el campo de la ecología-climatología fueron consultados mediante un cuestionario. (3) Se debe prestar más atención el límite superior. El límite superior es una relación de consistencia (CR)

que debe ser inferior a 0,1 para que se acepte un juicio matricial por pares (Saaty y Vargas, 2001) y adoptado en gran medida por el análisis.

Otra alternativa es combinar métodos con el uso de las técnicas del AJA. Por ejemplo, Deng et al., (2014) combina el método *fuzzy* y las técnicas AJA para calcular la idoneidad de la tierra para el cultivo de alfalfa al norte de China. En donde los autores aplican el análisis jerárquico analítico para determinar el peso de cada uno de los criterios.

Por otra parte, el Promedio Ponderado Ordenado (PPO), es otro método de análisis multicriterio utilizado para mejorar la aplicación del AJA en agricultura. Jiang y Eastman (2000) afirman que el enfoque PPO, proporciona una extensión y generalización de los métodos convencionales de combinación de mapas en el SIG. PPO es una clase de operadores multicriterio que incluye dos conjuntos de ponderaciones: ponderaciones de importancia del criterio y pesos de orden (Malczewski et al., 2003).

Otro método relativamente sencillo es la sumatoria lineal ponderada, se caracteriza por ser un método simple e intuitivo que permite la agregación de los criterios, adjudicándoles un peso de acuerdo a su importancia. Esta adjudicación de pesos, como forma de ponderar su importancia respectiva, es un aspecto clave en el proceso, y responde lógicamente a un juicio técnico. Es una aceptación absoluta de la compensación entre los criterios, en la que el juicio técnico introduce la proporción en que, según su estimación, el valor de un criterio

puede compensar el valor de otro. Si se entiende que el criterio es una parte delimitada del juicio, la agregación se intuye como un procedimiento acorde con el modelo (Galacho y Ocaña, 2006).

En el análisis de aptitud de la tierra la opinión de expertos es frecuentemente usado para determinar la selección de parámetros y la importancia de la ponderación de éstos estudios (Krueger et al, 2012). El método que comúnmente utiliza la opinión

de expertos es el AJA. De acuerdo con Bojórquez et al (2001) el número de expertos consultados puede variar de acuerdo al tema de investigación.

Estudios de aptitud como estrategias de adaptación al cambio climático

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el impacto negativo del cambio climático en el rendimiento de los cultivos en una amplia gama de regiones han sido más comunes que los impactos positivos (IPCC, 2014). El cambio climático provocará importantes impactos en la disponibilidad y el suministro de agua, modificando las precipitaciones, la evaporación, la escorrentía y el almacenamiento de la humedad del suelo así como una importante variación del régimen de temperaturas.

De acuerdo con Ruíz et al., (2016), la evidencia del reciente aumento de la temperatura en las regiones de cultivo y en las estaciones de crecimiento de la mayoría de los países mostraron una disminución significativa de la producción mundial de trigo y maíz. Además, el estrés hídrico que se ejercerá sobre los cultivos y el ganado adquirirá un carácter global debido a la variación extrema y al incremento de la temperatura de la estación de crecimiento con una respuesta negativa en los rendimientos de cereales como el trigo, maíz y cebada (Lobell y Field, 2007).

En China se estudió el arroz de regadío en la estación seca, lo cual mostró que, aunque los efectos de la temperatura máxima eran insignificantes en el rendimiento del arroz, el aumento de cada 1°C en la temperatura mínima de la estación de crecimiento en la estación seca provocó una disminución del 10% en el rendimiento del grano asociando aumento de la temperatura nocturna asociada al calentamiento global (Peng et al., 2004). Es por tanto, que el cambio climático provocará cambios en la disponibilidad de tierras agrícolas, provocando desplazamientos en las zonas de producción de cultivos alimentarios y no alimentarios y reduciendo la productividad de los cultivos (IPCC, 2018).

En América Latina se prevé que la temperatura aumente 1.4°C para el 2050 (FAO, 2018). Sin embargo, en México la variación de su geografía permitirá hacer más notable los cambios derivados del cambio climático como el incremento de las temperaturas máximas y mínimas en todo el país, especialmente durante junio-agosto en el valle central, siendo un importante corredor de producción de maíz, trigo y frijol (Prager et al., 2020).

En México, el cultivo de maíz es una de las principales actividades económicas del sector rural en cuanto a la extensión de siembra, generación de empleo familiar y suministro de alimentos. El total de la superficie de cultivos anuales del país corresponde a 18 millones de hectáreas (Statista, 2021), y el 95 % se dedica a la producción de granos (maíz, sorgo, trigo, frijol, cebada, soya y arroz), de estos, el maíz ocupa la mayor superficie con alrededor de 8 millones de hectáreas (SIAP, 2021).

Por lo tanto, los efectos del cambio climático podrían afectar la disminución del rendimiento del maíz y podría tener un impacto negativo mayor en la economía del país. Considerando que una tercera parte de la superficie agrícola en México es destinada al maíz siendo esencial para la seguridad alimentaria del país. Un ejemplo es lo que menciona Oré, (2020) en donde la falta de lluvias ha reducido cinco veces la producción de maíz en Tehuacan, Puebla.

Desde 2016, la superficie sembrada y la producción de maíz en todo México retrocedieron. En el ciclo 2016-17 se sembraron 7.7 millones de hectáreas de maíz y se cosecharon 27.5 millones de hectáreas del grano, de acuerdo a cifras oficiales. Para la cosecha 2018-2019 la siembra se redujo en un 4% y la producción en un 7%. Y, el Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA), con sede en México, estima que seguirán a la baja, obligando a las empresas a incrementar las importaciones del grano en 2020 al récord de 18 millones de toneladas.

Aunque el clima y el tiempo influyen en los componentes de la producción de cultivos (tanto la superficie de cultivo como la producción), la mayoría de los estudios se centran en su influencia en el rendimiento de los cultivos (Sotelo et al.,

2016). Por lo que, se argumenta que se debe considerar las características geográficas de la superficie de cultivo para una mayor visión del futuro impacto del cambio climático en la producción de alimentos (Lizumi y Ramankutty, 2015). En este sentido, la determinación de zonas agroecológicas adecuadas y la comprensión de las cuestiones relacionadas con el cambio climático sobre la aptitud agrícola del suelo para la producción de cultivos son importantes para mejorar el rendimiento y a su vez el sustento de los agricultores.

Ante este problema, se ha reconocido la importancia de considerar los análisis de aptitud de superficie agrícola como parte de las herramientas de adaptación ante el cambio climático (Lane y Jarvis, 2007; Liambila y Kibret, 2016; Romeijn et al., 2016). Un ejemplo, es el estudio sobre el impacto socioeconómico y del cambio climático y como impactó en la agricultura mostrando que las tierras muy aptas y adecuadas en África subsahariana disminuirá en determinados escenarios (Fischer et al, 2005). De este modo, es necesario desarrollar investigaciones que permitan desarrollar estrategias de adaptación y el diseño de políticas públicas que coadyuven en la toma de decisiones para gestionar y mitigar los impactos del cambio climático en el suministro mundial de alimentos (Teixeira et al., 2013; Günther et al., 2005).

Instrumentos de política pública y la aplicación de estudios de aptitud agrícola

La agricultura es una actividad económica, social y cultural, que provee un amplio rango de servicios ambientales a la población humana. Sin embargo, la agricultura por ser una actividad muy sensible a la variabilidad climática, los cambios en los patrones climáticos tendrán impactos en los sistemas de producción agrícola y en las comunidades que dependen de ella. En consecuencia, es de gran importancia identificar y evaluar opciones de adaptación de la agricultura a corto y mediano plazo.

La información generada de las investigaciones de aptitud del terreno permite brindar información para la planificación territorial ya que permite establecer y armonizar lineamientos sobre el tipo e intensidad de usos así como evaluar conflictos entre la demanda de recursos por parte de la población y la oferta de

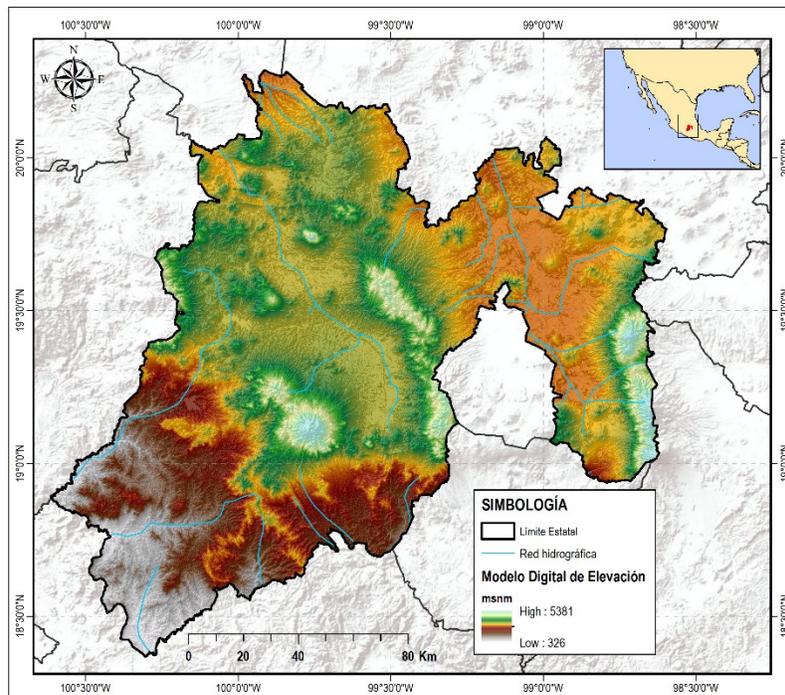
recursos por parte del ambiente (Zinck, 1996). Por otra parte, el análisis de aptitud agrícola es crucial en el esquema de la evaluación de sustentabilidad de sistemas agrícolas. En México, el Colegio de Postgraduados (Montecillo, Estado de México) es una de las instituciones que ha tenido gran interés por generar estudios enfocados a la zonificación de cultivos con gran participación del Centro de Edafología. Estas investigaciones sentaron las bases para aplicar la metodología en estudios agroclimáticos (Díaz et al., 2000) y agroecológicos (Ruiz, 1998 y Villa et al., 2001), en diversos estados y regiones del país.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) propuso la metodología para determinar el potencial productivo de especies vegetales y fue uno de los primeros intentos por delimitar las zonas potenciales para cultivos (INIFAP, 1995). En esta línea Medina et al. (1997) formulan otra metodología para determinar el potencial productivo de especies vegetales en México, la cual consiste en modelar con sistemas de información geográfica datos de clima, suelo y fisiografía, según los requerimientos de los cultivos.

Si bien, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en el 2012 elaboró el estudio potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México, en donde se determinó el potencial productivo de 55 cultivos en diferentes modalidades de humedad y ciclos de producción. En el mismo año, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) elaboró la carta de uso potencial de carácter nacional que incluye los tipos de utilización agrícola, pecuaria y forestal que muestran la posibilidad de ser establecidos en el terreno, así como también el grado en que los requerimientos técnicos y biológicos de cada tipo de utilización pueden satisfacerse por el conjunto de condiciones ambientales del terreno.

Área de estudio el Estado de México

El Estado de México está situado entre los paralelos 20° 20' 47.4" (latitud norte), así como los meridianos 98° 35' 19.68" (longitud este). Tiene una superficie de 22,338 km². En general, el Estado de México presenta una pendiente promedio de 20.23%. Con una precipitación anual acumulada de para el periodo de lluvias 900 mm y una temperatura media en la parte más cálida 25°C y temperatura del mes más frío mayor de 3°C. Los factores climáticos impactan sobre los suelos feozem, andosol, cambisoles con el 50% del total presenta superficies agrícolas y un 18% de superficies cubiertas de bosques (MadMex, 2018).



Criterios de decisión para el maíz grano de temporal

Parámetro	No apto	Aptitud baja	Aptitud media	Apto	Aptitud alta	Apto	Aptitud media	Aptitud baja	No apto
	1	2	3	4	5	4	3	2	1
Precipitación (mm)	<27	28-42.7	42.7-62	62-84	85-135	136-151	152-167	168-200	>200
Temperatura (°C)	<9	9-11.8	11.9-17.3	17.4-23.6	23.7-29.8	29.9-32.2	32.3-34.7	34.8-37.5	>37.5
Índice de aridez	<0.05	0.05-0.2	0.2-0.5	0.5-0.65	>0.65				
Pendiente (%)	>40%	30-40%	16-30%	8-16%	<8%				

De acuerdo con Sotelo et al (2016), se registró que los suelos más aptos son los feozem y ambisol, vertisol (bueno) y el acrisol, luvisol y leptosol son bajos para el desarrollo de maíz.

Resultados y discusión

Aptitud agroclimática para el cultivo de maíz grano de temporal

Se determinaron cinco categorías de aptitud agrícola las cuales representan la delimitación de regiones agroecológicas con base a las condiciones climáticas, de aridez, pendiente y suelo para el desarrollo del cultivo de maíz grano de temporal para el ciclo primavera verano. El resultado obtenido de este modelo de evaluación multicriterio para determinar zonas aptas para el crecimiento del maíz para el periodo base 1950-2000, presenta zonas con mayor al centro-norte del Estado de México. Se determinó que aproximadamente la mitad de la superficie agrícola dentro del Estado cuenta con las condiciones agroclimáticas para establecer maíz de temporal.

Las superficies aptas y de aptitud alta para el desarrollo de maíz, se encuentran principalmente en los valles altos del centro al noroeste del Estado de México, y a pie de monte al Sur del Estado. En suma de estas dos categorías, cuenta con 588,879 ha óptimas para el cultivo de maíz. Los suelos se caracterizan por texturas medias, los andosoles y feozem así como los vertisoles con características de suelos profundos lo que beneficia a la retención de agua aprovechable para las plantas (Violic, S/F). Si bien su distribución se llega a observar afectada por la pendiente. En este periodo, se registró 170,753 has con aptitud alta, 418,126 ha de superficie apta, 355,735 ha de aptitud media, 200,548 ha de aptitud baja y 37,120 ha de áreas no aptas.

Para el periodo 2045-2060 del modelo MPI ESL RM la distribución de las superficies aptas y de aptitud alta se mantienen al centro al noroeste del Estado de México, en general entre las zonas aptas y muy aptas se prevé con una superficie óptima de 585,435 ha. Para este escenario, se registró 275,500 has con aptitud, 309,935 ha de superficie con aptitud alta, 290,730.02 ha de aptitud media, 225,172 ha de aptitud baja y 74,230 ha de áreas no aptas (Ver tabla 1).

Tabla.1 Determinación de zonas de aptitud agroecológica del maíz grano.

Categoría de aptitud	Superficie de aptitud del maíz (ha)			
	Periodo base 1950-2000	% respecto a la Sup total EdoMex	MPI-ESM-LR RCP 85 2045-2069	% respecto a la Sup total EdoMex
No Apto	37,120.31	1.66	74,230.33	3.32
Aptitud Baja	200,548.64	8.98	225,172.96	10.08
Aptitud Media	355,735.60	15.93	290,730.02	13.02
Apto	418,126.49	18.72	309,935.24	13.88
Aptitud Alta	170,753.01	7.64	275,500.69	12.33

Cabe mencionar que no se tomaron en cuenta las superficies con uso de suelo urbano, cuerpos de agua, así como áreas naturales protegidas ésta última de acuerdo al archivo vectorial de marzo 2022 (CONANP,2022). En comparación con otros estudios, Márquez et al (1990) delimitó zonas agroecológicas para maíz en el Estado de México donde determinó 365,297 ha muy aptas. Por otra parte, Sotelo et al., (2016) reportaron 471,902 ha para el Estado de México. Sin embargo, el enfoque de esta investigación fue hacia el ciclo primavera-verano, el cual se ha reportado como el más productivo (SIAP, 2021). De acuerdo con el SIAP (2021), se reportaron 489,194 ha de superficie sembrada de maíz grano en el Estado de México, teniendo una diferencia de 99,685 ha respecto al reporte del periodo base, y una diferencia de 96,241 ha respecto a la superficie que se prevé para el periodo 2045-2060.

En la cartografía resultante se representan las zonas con mayor aptitud para el crecimiento del cultivo de maíz grano, en la cual se puede observar una reducción en la extensión de la superficie apta para los valles del centro del Estado respecto al escenario del periodo 2045-2060. Para este último, las condiciones climáticas prevén el surgimiento de zonas de aptitud alta al Sur y Poniente del Estado.

Por otra parte, para el periodo base las superficies de aptitud baja y no apta se concentran al sur del Estado de México, en donde se concentran las temperaturas más altas del territorio y donde las condiciones de precipitación no son adecuadas para el cultivo. En suma a estas variables, las condiciones de pendiente limitan la optimización de tierras para el maíz. No obstante, para el periodo 2045-2060 las

zonas no aptas incrementarían al doble respecto al periodo base, y las superficies de aptitud baja incrementarían alrededor de 1.1%.

En el periodo base, en los valles del Este del Estado se puede observar la concentración de superficies con aptitud media los cuales se ven beneficiados por la óptima precipitación más que por las condiciones edáficas ya que en esta región se presentan suelos de menor profundidad. En esta orientación del Estado, es en las superficies que son laderas de las montañas, se puede apreciar las superficies aptas y de aptitud muy alta para el desarrollo del maíz.

Es así como la distribución de las superficies con aptitud media para el año base se distribuyen en una franja este-oeste al Sur del Estado de México, así también se puede observar algunas superficies dispersas al noroeste del Estado. Y con mayor concentración de superficies el noreste. Para el periodo 2045-2060 se puede observar que la distribución de superficie de aptitud media al noreste se reduce y pierde superficie, alrededor de un 2.9%. En contraste, en la región Sur del Estado se puede observar la ganancia de superficie por esta categoría en función de las condiciones climáticas.

En este sentido la cuenca de Lerma y la del río Pánuco es donde se concentran las condiciones más óptimas para el cultivo de maíz. Sin embargo, aunque las condiciones de aptitud alta llegan a cambiar en 30 años por la severidad del clima, la opción de transición de agricultura de temporal a riego para el cultivo es una limitante en esta cuenca debido a la gestión hídrica del Sistema Cutzamala. En contraste las zonas aptas de la cuenca del Pánuco se ven mayormente beneficiadas por la concentración de unidades de riego con agua superficial.

En el Estado el cultivo de maíz representa una de las actividades agrícolas más importantes. El cultivo de maíz grano es uno de los cultivos que ocupa el 80% de la superficie agrícola respecto a los demás cultivos, y esta superficie se concentra en los valles altos del Noroeste del Estado de México. De acuerdo con el ICAMEX (2022) el rendimiento promedio esperado para el cultivo de maíz grano en el Estado de México es de 5.0 (ton/ha). Sin embargo, el rendimiento promedio del maíz reportado es de 3.73 ton/ha (SIAP, 2021). No obstante, es necesario considerar los

estudios de aptitud para llegar a alcanzar mayores rendimientos en regiones óptimas.

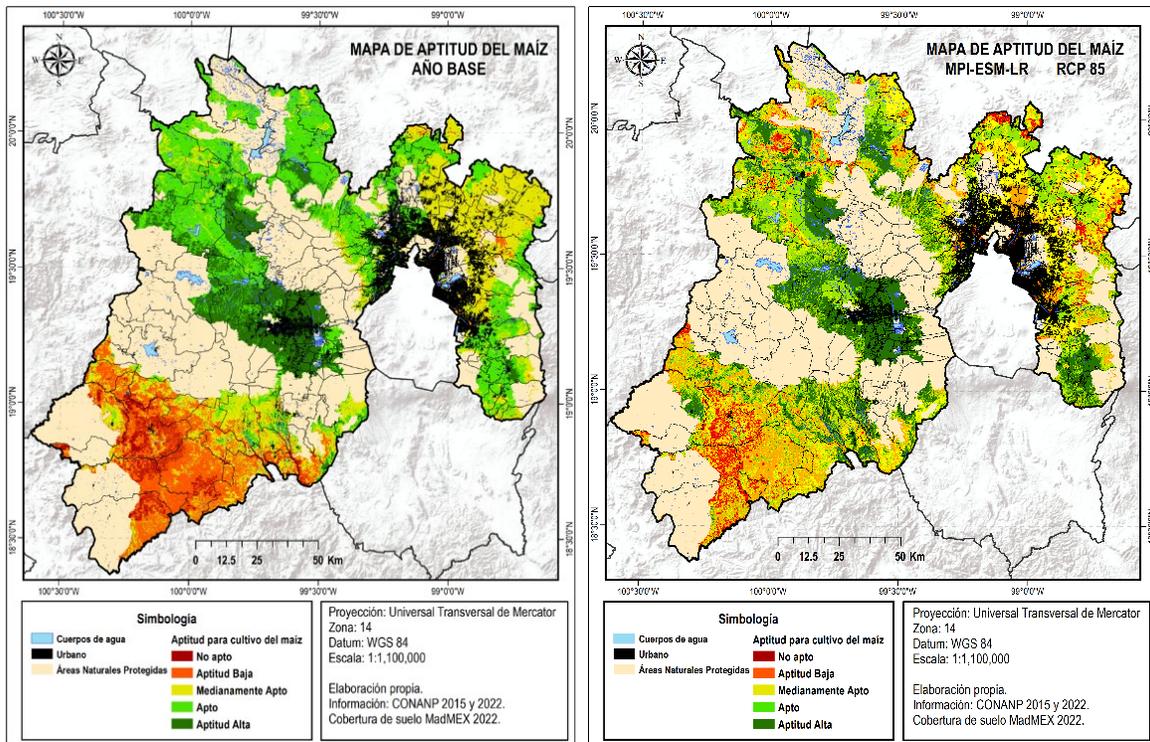


Figura 2. Distribución espacial de las cinco categorías de aptitud para el desarrollo del cultivo maíz grano en el ciclo primavera-verano. A la derecha se puede observar la distribución para el periodo base (1950-2000) y a la izquierda se puede observar la distribución para el horizonte temporal 2045-2060 del escenario MPI ESM LR con RCP 85.

Por otro lado, existe escasa investigación acerca de la actividad agrícola de temporal del maíz, Tinoco-Rueda et al., (2011) presenta una distribución potencial del maíz utilizando factores climáticos, tipos de suelo y pendiente, en este trabajo demuestra una disminución de la aptitud del debido a que las zonas con mayor pendiente son más vulnerables a las condiciones climáticas y deben estar sujetas a protección y conservación para evitar la degradación de los suelos. De acuerdo con el estudio de Sotelo Las variables que tienen mayor peso en la adaptación del maíz, para el Estado de México, son temperatura, altura, precipitación y tipo de suelos. Ruíz-Corral et al., (2000) determinan el efecto de las variaciones climáticas sobre superficies potenciales para producir maíz de temporal.

Estudios similares a la presente investigación, para la identificación de las zonas potenciales para el desarrollo y producción de los cultivos están los de Osorio et al. (2012) quienes mencionan que existe una demanda continua para identificar nuevas áreas para la producción de maíz en México y el mundo, por lo que cada año se impulsa la investigación para generar nuevas metodologías para la identificación de zonas con potencial para este cultivo.

Löffler et al. (2005) mencionan que la eficiencia de un sistema de evaluación de tierras depende del detalle de la información de clima, suelo y de la genética del cultivo en estudio. Hack-ten et al. (1993) establecen que en la evaluación de tierras, la productividad y los efectos ambientales deben ser investigados con información de los tipos de suelos y usos de la tierra.

Para Gómez et al., (2020) las variables climáticas que determinan la falta de aptitud del maíz es la temperatura media anual en combinación con la precipitación, así también, en su evaluación con enfoque de cambio climático se menciona que la zonas aptas para maíz disminuye considerablemente en la proporción de la superficie. María (2008) realiza una evaluación de las unidades de producción de maíz y concluye que se deben de tomar en cuenta las características socioeconómicas, el clima y el suelo para este tipo de estudios.

Por otra parte, Andrade et al., (2019) presenta las condiciones ideales para el desarrollo del maíz y propicia la conservación de los recursos agua-suelo-planta para garantizar el sustento alimentario para la población. Además, Sifuentes (2018) menciona la disponibilidad de agua es el factor ambiental más crítico para determinar la calidad y el rendimiento del cultivo.

Por su parte, Van Diepen (1993) propuso dos opciones metodológicas para la evaluación del potencial de rendimiento de granos en cultivos importantes en la Comunidad Europea, las cuales son comparadas con el método de las zonas agro-ecológicas. Shahbazi y Jafarzadeh (2010) utilizan el sistema automatizado de evaluación de tierras de la FAO (MicroLEIS). Para evaluaciones agro-ecológicas,

quienes concluyen que es una herramienta excepcional para hacer recomendaciones para la agricultura, el medio ambiente y la toma de decisiones.

Finalmente se determina que la metodología multicriterio y los usos del SIG para el manejo de la cartografía espacial, resultan muy importantes en la obtención de información concerniente a la toma de decisiones que beneficien en menor o mayor medida al aumento de la calidad de vida de la población; siempre y cuando los datos base justifiquen su aplicación.

Conclusiones

Con base a los resultados presentados el Estado de México tiene superficie potencial para maíz, solo hace falta que se tomen en cuenta estudios como este para la implementación y selección de las mejores zonas para la siembra; por lo tanto, la superficie y los rendimientos serán mayores, lo cual aportará a la seguridad alimentaria a partir el consumo local.

Lo expuesto en este proyecto, ha tenido como objetivo el dar a conocer ciertas consideraciones sobre algunas de las técnicas de análisis para la realización de mapas para la gestión agrícola del territorio y que permitan brindar información que sirva como herramientas de decisión como parte de la adaptación hídrica ante los posibles efectos al cambio climático.

En este caso de estudio para la determinación de zonas aptas para la implantación de áreas óptimas para el cultivo de maíz en el Estado de México. Los resultados que se muestran pueden contribuir de una manera importante al proceso de toma de decisiones ante cualquier problemática, ya que la información generada puede ser de gran utilidad para futuros planes de desarrollo agrícola sustentable.

El análisis multicriterio y la incorporación de los factores y restricciones, permitieron la determinación de la localización óptima de zonas destinadas para el cultivo de maíz grano a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo la modelización de los criterios y variables seleccionadas. En el mismo contexto, el proceso de sumatoria lineal ponderada, es uno de los métodos de evaluación multicriterio para la toma de decisiones más utilizados en la actualidad, y en el

presente estudio, contribuyó a sistematizar procesos complejos, brindando una optimización en los mismos para el manejo adecuado de la información.

Sin embargo, debe considerarse que los métodos de evaluación multicriterio manejan algún grado de incertidumbre en la asignación de los juicios de valor, debido a que las categorías asignadas a las clases de los mapas, operan en función de criterio cualitativos, de modo que en cuanto más conocimiento se tenga sobre el tema tratado, los supuestos y los coeficientes empleados así como los resultados serán más acertados.

Por otro lado, es necesario enfatizar que para este estudio se tomaron en cuenta sólo algunas capas de información disponibles, que sirvieron como factores y restricciones que determinaron en gran parte las características o limitantes para el establecimiento de parcelas de maíz grano, y con un enfoque de la importancia hídrica. Sin embargo, existe información a la que no hubo acceso y es de suma importancia para que este modelo sea más consistente, y que deberían tomarse en cuenta, como lo son: los grados días calor, tenencia de la tierra.

En el mismo contexto, la calidad de los resultados dependerá de la calidad de los datos espaciales así como de la disponibilidad y de la escala de los mismos. Por último, la adecuada integración de la información en una EMC como la suma ponderada en un SIG, puede ofrecer una buena perspectiva en la evaluación de zonas con mejores condiciones de clima, suelos y fisiografía para la producción de maíz grano en el Estado de México. Destacando que esta metodología pudiera ser extrapolada a diferentes escenarios para poder enriquecerla con nuevos criterios (factores y restricciones) y así obtener mejores resultados, para futuras tomas de decisiones.

Los resultados para el caso del Estado de México, particularmente la región Atlacomulco que consistió en la zona de estudio, reportan un incremento en los rendimientos de la agricultura de temporal, posiblemente asociado con un aumento en las temperaturas mínimas, lo que podría reducir el peligro de las heladas que dañan frecuentemente a este tipo de cultivos. Sin embargo, otras regiones de la

entidad podrían aumentar su vulnerabilidad, ya sea por los decrementos en las superficies aptas para este tipo de cultivos o por la reducción en los rendimientos

Los resultados previos indicaron que alrededor del 50% de la superficie estatal agrícola presenta algún grado de aptitud para la producción de maíz de acuerdo a las características geográficas del territorio. Específicamente el 42% mostró condiciones adecuadas, ya que el 8.9 y 1.6% indicaron condiciones moderadas y limitadas, respectivamente. De igual manera es necesario considerar analizar el comportamiento del maíz en más de un solo escenario de circulación general.

El método desarrollado en este artículo ha sido aplicado a escala regional para otros cultivos por lo que puede entenderse como una herramienta útil para nuevos estudios sobre el cambio climático en el país y sus posibles efectos en la distribución de cultivos primordiales en el Estado de México y en la nación. A su vez, se considera que a partir de esta investigación sea un parteaguas para la elaboración de investigaciones de aprovechamiento de humedad del suelo para mejorar la eficiencia y productividad del agua en las zonas agrícolas del maíz, ya que para esta investigación es la variable de mayor determinación de áreas óptimas en el horizonte temporal 2045-2060.

Referencias bibliográficas

Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J. y Contreras, C. 2010. Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región Huasteca (México). Revista Corpoica Ciencia y tecnología agropecuaria. Vol 11, Num 2. 144-154.

Bautista, E., Gutiérrez, E., Ordaz, V., Gutiérrez, M. y Cajuste, L. 2018. Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. Terra Latinoamericana 36: 261-273. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>.

CONANP.2022. Áreas Naturales Protegidas. Archivo shapefile. Marzo 2022 Sitio web: http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm, 15 de mayo 2022.

Luis A. Bojórquez-Tapia, Salomón Díaz-Mondragón y Exequiel Ezcurra (2001) GIS-based approach for participatory decision making and land suitability assessment, International Journal of Geographical Information Science, 15:2, 129-151, DOI: [10.1080/13658810010005534](https://doi.org/10.1080/13658810010005534)

Bozdag, A., Yavuz, F. y Günay, A. (2016) AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) County. Environmental Earth Science, 75, 813.

Buenrostro, O., Mendoza, M., López, E. y Geneletti, D. 2008. Analysis of land suitability for the siting of inter-municipal landfills in the Cuitzeo lake basin, México. Vol 8., issue 7, pag. 1137-1146.

Bustillos, A., Valdez, R., Aldrete, A., Gonzalez M. 2007. Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. Agrociencia, 41, 787-796.

Ceballos, A. y López, J. 2003. Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central México: a multicriteria and GIS approach. Agriculture, ecosystems and environment. Vol. 95 issue 1 Pages 371-377.

Ceballos, C., Valdez, J., Fierros, A., De los Santos, H. y Gómez, A. 2010. Aptitud de áreas para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz: Proceso de análisis jerarquizado vs álgebra booleana. *Revista Mexicana en Ciencia Forestal*. Vol 1. Num 1.

Deng, F., Li, X. Wang, H., Zhang, M., Li, R. y Li, X. 2014. GIS based assessment of land suitability for alfalfa cultivation: a case study in the dry continental steppes of northern China. *Journal of Agricultural Research*. Vol 12. Num 2.

De Haan, R. 2020. A GIS based land suitability analysis for productive growth of wild cherry (*Prunus avium*) on pastures in Ireland. Msc thesis in forest ecology and management.

Filipov, F. y Curea, D. 2015. Land suitability of comarca catchment basin for cherries trees. *Seria agronomie*. Vol. 58, 2.

Galacho Jiménez, F. B., Ocaña Ocaña, C. 2006. Tratamiento con SIG y Técnicas de Evaluación Multicriterio de la Capacidad de Acogida del Territorio para Usos Urbanísticos: Residenciales y Comerciales.

Gomez, J., Flores, R. y Monterroso, A. 2020. Aptitud actual bajo escenarios de cambio climático para tres cultivos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 11. Num 4.

Hack-ten, B. D. J. M.; Van Lanen J. A. H. and Bouma, J. 1993. The leaching potential as a land quality of two Dutch soils under current and potential management conditions. *Geoderma*. 60(1-4):73-88.

Hernández, P., Valdez, J. Aldrete, A. y Martínez, A. 2019. Evaluación multicriterio y multiobjeto para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales. *Madera y Bosques*. Vol 25. Num 2.

Jafarzadeh, A.A., Alamadari, P., Neyshabouri, M.R. Saedi, S. 2008. Land suitability evaluation of Bilverdy Research station for wheat, barley, alfalfa, maize and safflower. *Soil and water*, 3, 81-88.

Jasso, M., Soria, J. Antonio, X. 2022. Pérdida de superficies cultivadas de maíz de temporal por efecto de las heladas en el valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol.13. Número 2.

Jimenez, A., Vargas, V., Salinas, W., Aguirre, M., Rodriguez, D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*. Num 53, pp. 58-74.

Ojeda, W., Sifuentes, E. Rojano, A. e Iñiguez, M. 2012. Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *Compilación Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México. Volumen IV. Adaptación al cambio climático*.

Osorio, G. N.; López, S. H.; Gil, M. A.; Ramírez, V. B.; Gutiérrez, R. N.; Crespo, P. G. y Montero, P. A. 2012. Utilización, oferta y demanda de tecnología para producción de Maíz en el valle de Puebla, México. *Agric. Soc. Des.* 9(1):55-69.

Löffler, M. C.; Wei J.; Fast T.; Gogerty, J.; Langton, S.; Bergman, M.; Merrill, B. and Cooper, M. 2005. Classification of maize environments using crop simulation and geographic information systems. *Crop Sci.* 45(5):1708-1716.

María, R. A. 2008. El proceso de análisis jerárquico con base en funciones de producción para planear la siembra de maíz de temporal. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas. Centro de Edafología. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 223 p.

Márquez, R. F. 1990. Zonificación agroecológica del maíz (*Zea mays*) de temporal en el Estado de México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Estado de México. 95 p.

Montiel, I., Martínez, S., López, A. y García, G. 2017. Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). *Revista Chapingo serie Zonas áridas*. Vol 16. Num 1. Pp1-13.

SIAP. 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Sitio web: https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/ 12 Enero 2022.

Sifuentes, E. .2018. Los requerimientos hídricos del maíz. Panorama Agro

Sifuentes, E., Ojeda, W., Macías, J., Mendoza, C. y Preciado, P. 2021. Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. Agrociencia. 55:209-226.

Statista. 2021. Statista Research Department. Sitio web: en <https://es.statista.com/temas/7029/el-sector-agricola-en-mexico/#dossierKeyfigures> 12 Enero 2022.

Shahbazi, F. and Jafarzadeh A. A. 2010. Integrated assessment of rural lands for sustainable development using MicroLEIS DSS in West Azerbaijan, Iran. Geoderma. 157(3-4):175-184.

Sotelo., E., Cruz, G. González, A. y Moreno, F. (2016) Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol. 7, Num 2.

Orozco, M. E., García, B., Álvarez, G. y Mireles, P. 2017. Tendencias del sector agrícola, Estado de México. Quivera. Año 19, 99-121.

Olivas, U., Valdez, R., Aldrete, A., González, M. y Vera, G. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. Revista Fitotecnia Mexicana. Vol. 30, Núm., 4 pp.411-419.

Gómez, J., Flores, R. y Monterroso, A. (2020) Aptitud actual bajo escenarios de cambio climático para tres cultivos en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol. 11 Número 4.

Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. Inf Control 8:338–353