

# **Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático**

Subdirección de Vinculación

## **Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**

**Diciembre 2021**

## CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos internacionales para reducir los efectos al Cambio Climático... 7	7
1.2. Hipótesis.....	8
1.3. Justificación.....	8
1.4. ¿Cuáles son los beneficios para el Estado de México? .....	9
1.5. Objetivos .....	9
1.5.1. Objetivo general .....	9
1.5.2. Objetivos específicos .....	9
2. Metodología.....	10
2.1. Área de estudio.....	10
2.2. Zonificación agroclimática .....	11
2.3. Análisis de idoneidad del terreno.....	11
2.3.1. Clases de idoneidad del suelo.....	12
2.4. Base de datos espacial.....	13
2.4.1. Procesamiento previo.....	15
2.4.2. Objeto de estudio: maíz y cebada.....	16
2.5. Definición de los umbrales.....	19
2.6. Análisis de idoneidad de los cultivos en condiciones de secano .....	21
Distribución climática .....	24
2.7.. Modelos de Circulación General (MCG) .....	21
2.8. Forzamientos radiativos y horizontes futuros .....	22
2.9. Precipitación y temperatura del Modelo MxMPIESML RCP 85 Horizonte temporal 2075-2099 .....	32
Bibliografía .....	36

## **Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**

### **1. 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).

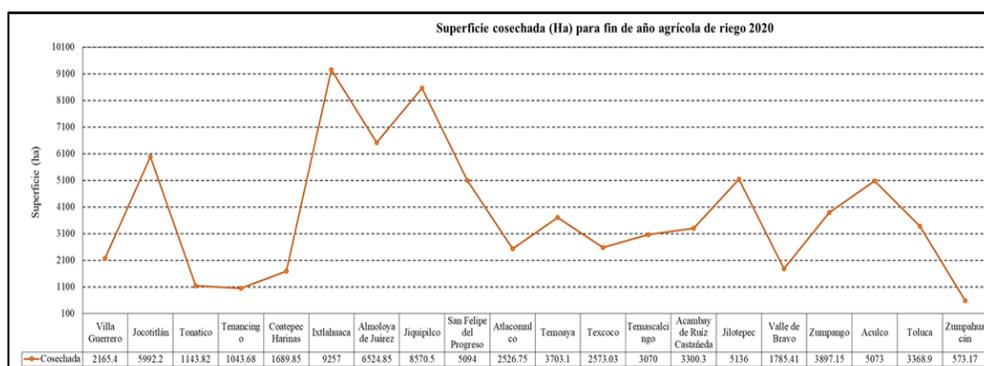
Siendo así que, la agricultura es uno de los sectores productivos más afectados por el cambio climático, pues este fenómeno impacta negativamente la producción (ciclo biológico de cada cultivo, temperatura, exposición solar y disponibilidad de agua para las plantas), los medios de vida de la población que depende de esta actividad, así como disminuir 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 Gutiérrez et al 2020).

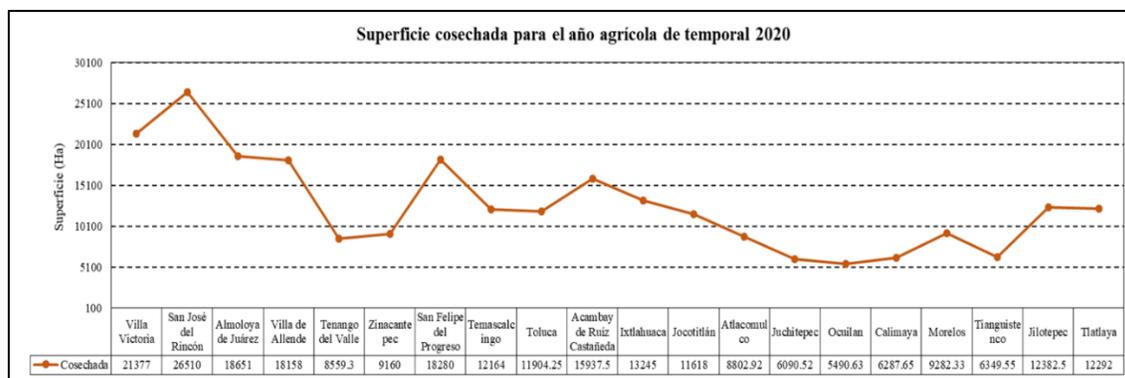
En América Latina se prevé que la temperatura aumente 1.4°C para el 2050. Sin embargo, en México la variación de su geografía permitirá hacer más notable los cambios derivados del cambio climático como el incremento de las temperaturas máximas y mínimas en todo el país, especialmente durante junio-agosto en el valle central, un importante corredor de producción de maíz, trigo y frijoles (Prager et al 2020). El maíz es uno de los principales productos agrícolas que se comercializa en los mercados locales (ICO, 2020), por lo tanto, la disminución de su producción podría tener un impacto negativo

mayor en la economía. Una tercera parte de la superficie agrícola en México es destinada al maíz el cual es considerado esencial para la seguridad alimentaria del país.

En México se identifican dos tipos de agricultura; de riego y de temporal, siendo esta última la que mayor superficie agrícola ocupa y se dedica a ella un gran número de productores. De acuerdo al SIACON (2008), en su glosario de términos separa a la agricultura en superficie de temporal y superficie de riego, definiendo la primera como “el área en la que el desarrollo completo de los cultivos depende exclusivamente de las lluvias o de la humedad residual del suelo” y la superficie de riego como “es el área donde se realiza la aplicación artificial de agua para beneficiar los cultivos”. Según INEGI (2009) la agricultura de temporal “es aquella que depende exclusivamente de las lluvias y permite sembrar una vez al año”. Otro concepto nos dice que, “la agricultura de temporal es aquella que se realiza con agua de lluvia, es decir, su éxito depende de la precipitación y la capacidad del suelo para retener humedad.

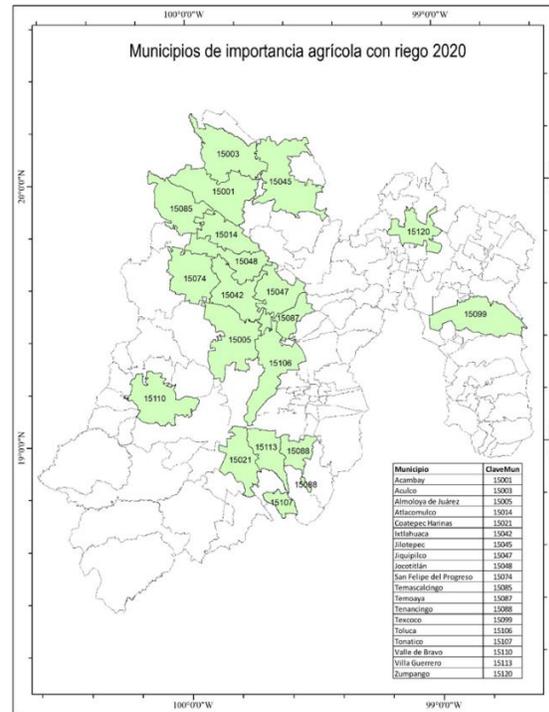
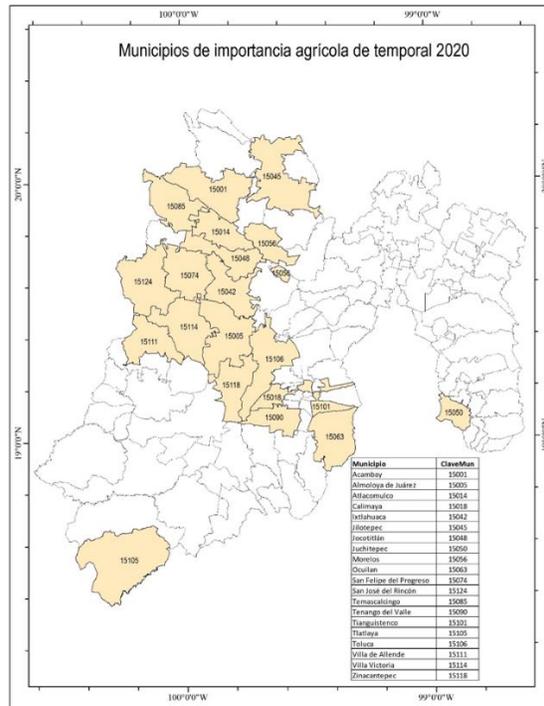
El Estado de México se localiza en la porción sur de la altiplanicie meridional de la República Mexicana y está integrado por 125 municipios (INEGI, 2008). De acuerdo con el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGECEM) de 2016 a 2017, en promedio se sembraron aproximadamente 861 mil hectáreas, de las cuales 82 por ciento corresponde a cultivos de temporal y 18 por ciento a cultivos de riego. Sin embargo, el SIAP





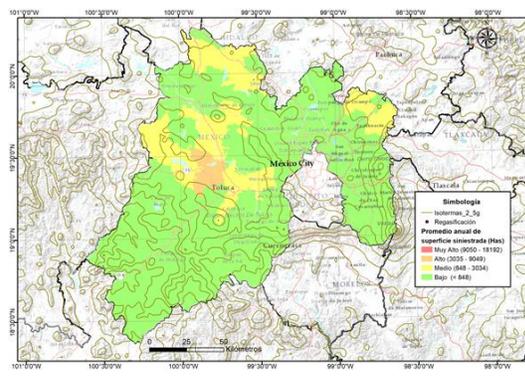
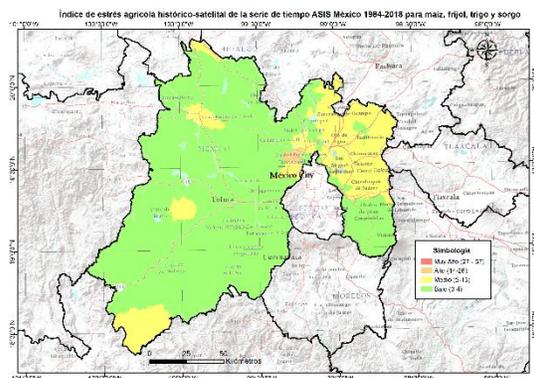
**I.1.** Principales municipios del Estado de México con superficie cosechada para de temporal y de riego 2020. Fuente: Elaboración propia con base en la información por el SIAP (2020).

Además, poco más de 645 mil hectáreas son de temporal y 146 mil corresponden a superficie de riego. Sin embargo, entre 2010 y 2016 las superficies sembradas y cosechadas disminuyeron de 908.8 y 882.2 miles de hectáreas a 784.3 y 780.2 miles, respectivamente. La mayor parte de la superficie sembrada representa el 75.6 por ciento y es destinada al cultivo de cereales como, 67.1 por ciento del total a maíz para autoconsumo, 5.9 por ciento a cebada y avena y 14.9 por ciento a forrajes (SIAP, 2016). Los municipios que destacan por su aptitud agrícola son Toluca, Zumpango, Texcoco, Tejupilco, Atlacomulco, Coatepec Harinas, Valle de Bravo y Jilotepec.



**1.2. Distribución de los municipios del Estado de México de importancia agrícola y riego. Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada en**

Con base en el Índice de estrés agrícola de la FAO 1984-2018, los municipios Atlacomulco de Fabela, Valle de Bravo, Tlatlaya y municipios al Noreste del Estado de México se reportaron en grado medio de estrés agrícola para el rendimiento de cultivos como maíz, frijol, trigo y sorgo. No obstante en el mapa de promedio anual de superficie siniestrada, es decir el área sembrada que registró una pérdida total por afectaciones de fenómenos climáticos durante el periodo del 2010-2019 se concentra en niveles altos al noroeste de la zona metropolitana de Toluca y niveles medios a sus alrededores alcanzando niveles medios hacia el municipio de Atlacomulco de Fabela y Jilotepec de Abasco.



1.3. A la izquierda se puede observar la variación espacial del Índice de estrés agrícola de México. A la derecha se observa la distribución del promedio anual de suada para el Estado de México durante el 2010-2019. (FAO, [www.fao.org/giews/earthobservation/asis/index\\_1.jsp?lang=es](http://www.fao.org/giews/earthobservation/asis/index_1.jsp?lang=es))

En cuanto a la regionalización de Cambio climático generada por Ruiz et al (2016), el Estado de México se agrupa por características de calentamiento moderado con desecación de muy somera a somera, por lo que se pronostica para el 2050 la temperatura aumente de 1° a 2°C y la precipitación disminuya entre 10 a 50 mm. En contraste, una parte del Estado de México se agrupa por características de enfriamiento somero por una disminución de -0.5 a 0°C y una reducción de precipitación de -10 a 0 mm.

El cambio climático altera los fundamentos de los ecosistemas productivos (por ejemplo, la temperatura y las precipitaciones), afecta a los recursos recursos naturales (por ejemplo, la disponibilidad de tierra y agua) y la producción y la producción forestal. Según las proyecciones del cambio climático, se espera que Estado de México se vuelva más calurosa y seca, sobre todo en verano.

Se prevé que las tendencias del cambio climático aumenten las temperaturas y disminuya la disponibilidad de agua en todo el Estado a lo largo del próximo siglo. El aumento de las temperaturas implica una mayor y un aumento potencial de la temperatura del suelo en primavera, pero también un mayor estrés térmico en verano de primavera. Estas condiciones pueden afectar al número anual

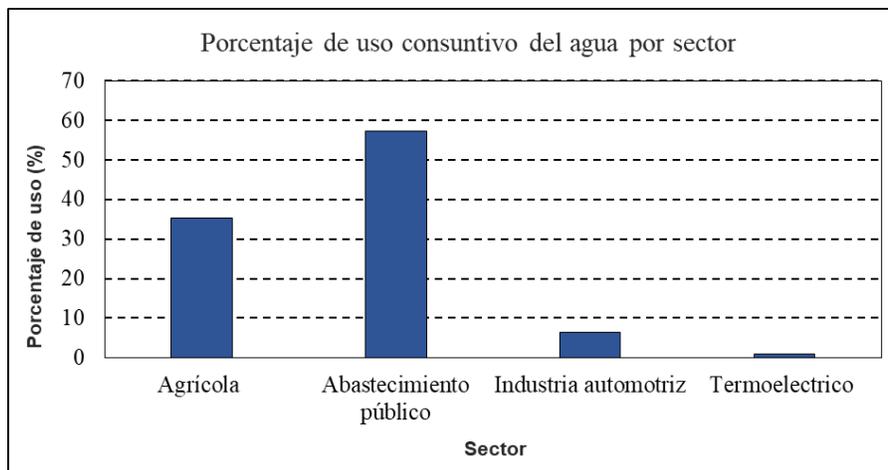
de días de vegetación activa (temperatura superior a 5°C) en las tierras bajas del país a mediados de siglo.

Esto puede dar lugar a cambios en los cultivos en función de sus necesidades de calor, luz y agua de calor, luz y agua de los cultivos, lo que afectaría a las zonas de agricultura de temporal y de riego. Las zonas actualmente. Actualmente, las zonas no aptas para la agricultura pueden volverse más atractivas. Además, el aumento de las temperaturas junto con capacidad de suministrar agua adecuada (riego) podría aumentar el rendimiento, especialmente de los cultivos de invierno, que se cultivarán en condiciones suaves. Los impactos adversos, es decir, el riesgo de sequía, el granizo, las inundaciones, las heladas, etc., pueden afectar a la producción de los principales cultivos básicos como el maíz.

Debido a esto es necesario asumir que el cambio climático está sucediendo ahora, y en distintos plazos a futuro afectará sectores tan críticos para el desarrollo como la seguridad alimentaria local. De este modo se vuelve necesario buscar medidas que mitiguen los problemas y permitan la adaptación, ¿Es posible evaluar los cambios en la superficie con aptitud agrícola en función a sus requerimientos hídricos? ¿Se puede deducir como cambiarían las variables físicas en determinado espacio de tiempo la zona en la que hoy se utiliza como superficie para siembra? ¿Esa misma zona sería apta en un futuro? si no lo es ¿En qué medida cambiara su aptitud? ¿Existirá una zona que haya adoptado las mismas condiciones de la zona actual y sea óptima para cultivar? ¿Cómo se ha afectado la producción de agroalimentos en el estado de México por siniestros asociados a eventos hidroclimáticos extremos? ¿Cuál es el consumo actual del agua en el sector agrícola del Estado de México? Estas son preguntas que deben hacerse y a las que se debe dar respuesta para tener herramientas con las cuales sea posible tomar decisiones y reducir la vulnerabilidad ante impactos del cambio climático.

En la actualidad, de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) 2020, lo que corresponde al Estado de México, el 35% del volumen que se concesiona es para el abastecimiento de las actividades agrícolas y menos representativo con el 6.65% para uso industrial automotriz e hidroeléctrico. Cabe resaltar que dentro del volumen concesionado para uso público urbano se consideran aproximadamente 595.47 hm<sup>3</sup>/año que se exportan a la Ciudad de México, de los cuales 283.9 hm<sup>3</sup>/año de aguas superficiales provenientes del sistema Cutzamala y el resto de agua subterránea provenientes de los acuíferos de Lerma y los pertenecientes del Valle de México.

### **Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**



**1.4.** Distribución porcentual de uso consuntivo del agua por sector. Fuente: Elaboración base en el REPDA (2020).

### 1.1. Objetivos internacionales para reducir los efectos al Cambio Climático

Como estrategia global, en 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en el marco de la Agenda 2030 estableció los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que constituyen las líneas de acción para acabar con la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo (ONU, 2020).

El segundo objetivo ODS, denominado “Hambre cero” implica una modificación profunda en el sistema agroalimentario mundial que permita alimentar a más de 820 millones de personas que padecen hambre y a la población creciente. Adicionalmente, el décimo tercer objetivo ODS “Acción por el clima” busca abordar la emergencia climática, a través de un conjunto de medidas que permitan salvar vidas y medios de subsistencia. Entre sus metas principales se encuentra el fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

En el contexto de los ODS, en el Plan de Desarrollo Estatal del Estado de México se compromete a desempeñar un papel fundamental que contribuya en disminuir considerablemente el hambre, lograr la seguridad alimentaria y promover una agricultura sostenible. En dicho papel, el Estado de México destaca la importancia del incremento de la productividad agrícola y de los ingresos de productores de alimentos en pequeña escala, que representan la mayoría de los agricultores y ganaderos de la entidad, con especial énfasis en las mujeres, los pueblos indígenas y los agricultores familiares.

### **Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**

Lo anterior debe darse en un marco de sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y la aplicación de prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas y fortalezcan la capacidad de adaptación y mitigación al cambio climático.

## **1.2. Hipótesis**

La planeación de tierras agrícolas a través del análisis de aptitud agrícola de cultivos estratégicos en función de disponibilidad hídrica para la irrigación presente y futura en el Estado de México llega a ser una medida de adaptación al Cambio Climático que puede funcionar y reducir sus impactos en la producción de alimentos. Por lo tanto la planificación del uso del suelo agrícola permitirá apoyar la optimización de la gestión hídrica en el esquema de la agricultura sostenible.

## **1.3. Justificación**

El estudio será de utilidad para determinar áreas en las que se necesitan mejoras para apoyar la planificación estratégica en torno a las inversiones y el potencial del riego así como implementar medidas de adaptación que les permitan reducir su vulnerabilidad actual y futura. ya que estará enfocado en determinar las necesidades de riego en diversos escenarios condiciones condicionados al cambio climático.

Así también permitirá conocer la importancia del riego, específicamente para los cultivos de alto valor que se produzcan en el Estado de México, ya que puede reportar beneficios económicos atractivos para productores. El riego suplementario es una tecnología que puede garantizar la satisfacción de las necesidades de agua en las etapas críticas de los cultivos durante los meses más secos del año así como, durante los años de sequía, o presencia de ondas de calor en las que el riego puede ayudar a salvaguardar los rendimientos del cultivo.

Por esta razón, el riego es clave para minimizar el estrés de los cultivos, ya que permite conseguir uniformidad y alta calidad. El riego también puede ayudar a proteger los cultivos durante el invierno, como estrategia contra las heladas. A su vez, encargados del manejo técnico de actividades agrícolas como agrónomos, biólogos y otros, pueden adaptar estos resultados a necesidades específicas de producción en el campo y confort en la población rural. Con base a los resultados, la siguiente información puede ayudar a la distribución uniforme de los recursos hídricos, ayudando a la

conservación de los mismos y al aumento de la productividad y optimización de gastos en energía para los agricultores.

#### **1.4. ¿Cuáles son los beneficios para el Estado de México?**

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), hay cinco intervenciones normativas clave:

1. Incluir medidas de adaptación y atenuación para la gestión del agua destinada a la agricultura en los planes nacionales de desarrollo.
2. Promover medidas técnicas y de gestión para incrementar la flexibilidad de la agricultura de secano y la de irrigación, y reducir la pérdida de agua en los sistemas de producción con irrigación.
3. Mejorar el conocimiento sobre el cambio climático y el agua y difundir buenas prácticas entre los países y las regiones.
4. Promover políticas nacionales de gestión de riesgos mediante mejores redes de vigilancia y productos de aseguración innovadores.
5. Movilizar fondos de adaptación para afrontar los desafíos del agua y la seguridad alimentaria causados por el cambio climático

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

El siguiente proyecto tiene como objetivo determinar superficies de aptitud agrícola de los cultivos de alto valor como el maíz, cebada, frijol y avena forrajera con base a la disponibilidad hídrica necesaria para el desarrollo del cultivo así como bajo las condiciones del estado actual y escenarios futuros de cambio climático.

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

1. Identificar las superficies de los cultivos de interés para el análisis en el Estado de México.

Estimar el volumen actual (año 2021) de requerimiento de agua para el cultivo de interés a partir de técnicas de percepción remota Imágenes Landsat 8 OLI.

2. Identificar las áreas de cambio en aptitud agroclimática de cultivos frente al cambio climático en el Estado de México para el horizonte temporal 2075-2099, mediante metodologías multicriterio.
3. Calcular el índice de balance hídrico a partir de datos de NDVI y evapotranspiración
4. Evaluar la eficiencia del riego respecto a los requerimientos hídricos de los cultivos de objeto de estudio bajo escenarios de cambio climático

## 2. Metodología

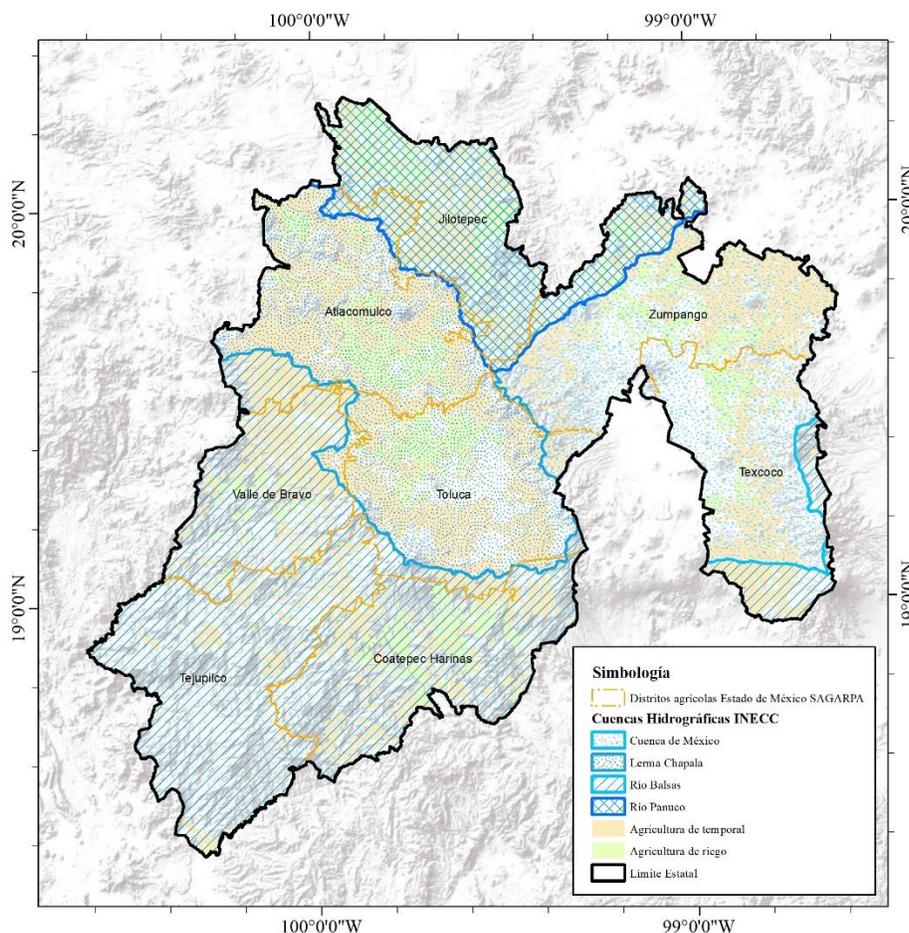
Para evaluar el área de distribución ecológica potencial de las plantas, en general, se pueden emplear dos métodos (Reisner et al., 2007). Puede hacerse directamente a partir de bases de datos que se basan en observaciones reales de las zonas donde crecen las plantas, que luego se generalizan para cubrir un área mayor. Esto se ha hecho a escala europea para muchas especies forestales, como por ejemplo: para el Atlas Europeo de Especies de Árboles Forestales (2016). Otra forma, es cartografiar indirectamente las zonas donde se cumplen los requisitos de crecimiento ecológico. La segunda estrategia es por la que se ha optado en este estudio. La creación de la cartografía se realizará mediante un análisis de idoneidad del terreno basado en el ambiente de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El análisis de idoneidad del suelo (AIS) es un método que tiene como objetivo identificar el patrón espacial más apropiado para los usos del suelo de acuerdo con requisitos específicos, preferencias o predictores de alguna actividad (Malczewski, 2004). En este estudio, el AIS se lleva a cabo utilizando la herramienta de software QUICKScan, un entorno de modelización espacial que combina el conocimiento de expertos con datos espaciales y estadísticos (QUICKScan, 2020). El resultado de QUICKScan se superpondrá a un mapa de pastos y la cobertura agroforestal total se comparará con los objetivos del gobierno del Estado de México y el estudio de Sotelo et al. (2016).

### 2.1. Área de estudio

El Estado de México se describe como la región de transición del centro de México. Está situada 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 km<sup>2</sup>, su territorio incluye ocho grandes regiones agrícolas, además de caracterizarse por unidades naturales y geográficas con su base hidrográfica: La cuenca hidrográfica del Pánuco, la cuenca del Balsas y la Cuenca de Lerma-Santiago.

**Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**



**2.1.** Mapa de localización del Estado de México y sus distritos agrícolas por ica. Fuente: Elaboración propia con base al INECC y SAGARPA.

## **2.2. Zonificación agroclimática**

La capa de zonificación agroclimática se elaboró mediante el sumatorio de cinco variables reclasificadas: Período libre de heladas, Temperatura máxima del aire en el mes más cálido, Duración del período de crecimiento, Índice de aridez y Altitud del terreno a partir del MDE. Cabe señalar que el valor numérico asignado a cada clase (valor de clase) permite identificar las diferentes combinaciones en el producto sumatorio. A continuación, se realizó un cálculo estadístico para identificar las zonas de clase más pequeñas.

## **2.3. Análisis de idoneidad del terreno**

**Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México**

La idoneidad de la tierra para el crecimiento de los árboles y el uso agrícola no está definida por un único parámetro, sino que necesita la aportación de varios parámetros, que pueden dividirse a su vez en varios criterios (Prakash, 2003). Estos criterios pueden evaluarse en función de su influencia mediante el análisis de decisiones multicriterio (MCDA). Operativamente, el MCDA apoya la estructuración de los problemas de decisión, la evaluación del rendimiento de las alternativas a través de criterios, la exploración de compensaciones, la formulación de una decisión y la prueba de su solidez (Esmail y Geneletti, 2018).

En el ámbito de la conservación, el MCDA se ha utilizado cada vez más para identificar la (s) alternativa(s) más adecuada(s), combinando la información fáctica con la información basada en el valor recopilada a través de la participación de las partes interesadas. La participación de las partes interesadas y el conocimiento de los expertos es una parte del método MCDA que se utiliza a menudo. Esto puede realizarse, por ejemplo, mediante talleres con expertos en el campo de interés. Para este estudio no se ha organizado ningún taller de este tipo. En su lugar, se analiza la información de la literatura y se combina con el conocimiento de los expertos.

Los primeros pasos del análisis de idoneidad del terreno son la recopilación de datos, el establecimiento de clases de idoneidad y la formulación de los criterios. A continuación se realiza el análisis de decisión multicriterio, que se lleva a cabo en el entorno de modelización QUICKScan.

### **2.3.1. Clases de idoneidad del suelo**

La estratificación del mapa de idoneidad se realiza en términos de cuatro clases, basadas en las directrices de idoneidad de la tierra de la FAO (FAO, 2019). La FAO presenta dos órdenes de aptitud: el orden "apto" y el orden "no apto". Estos órdenes se pueden dividir a su vez en clases. Para este estudio, el orden adecuado se divide en tres clases, y el orden no adecuado representa una clase.

<b>Muy adecuado</b>	No tiene limitaciones significativas para la aplicación sostenida de un uso determinado, o sólo limitaciones menores que no reducirán significativamente la productividad o los beneficios y no elevarán los insumos por encima de un nivel aceptable.
<b>Adecuado</b>	Con limitaciones que, en conjunto, son moderadamente graves para la aplicación sostenida de un uso determinado; las limitaciones reducirán la productividad o los beneficios y aumentarán los insumos necesarios hasta el punto de que la ventaja global que se obtendrá del uso, aunque siga siendo atractiva, será sensiblemente inferior a la esperada en las tierras de la clase S1.
<b>Marginalmente adecuado</b>	Tienen limitaciones que en conjunto son severas para la aplicación sostenida de un uso determinado y que reducirán de tal manera la productividad o los beneficios, o aumentarán los insumos requeridos, que este gasto sólo se justificará marginalmente.
<b>No apto</b>	Terreno que tiene cualidades que parecen impedir un uso sostenido del tipo considerado

	Muy Adecuado (100%)
	Adecuado (80%)
	Moderadamente adecuado (50%)
	Baja adecuación (30%)
	Áreas marginales (10%)
	Áreas no adecuadas
	Otros usos de suelo

En general, el análisis de este estudio se hace con la idea de que los terrenos se etiquetan como aptos cuando lo son "tal cual". A menudo, los suelos agrícolas o los utilizados para las plantaciones forestales se modifican para adaptarlos a las necesidades del cultivo o del árbol. Por ejemplo, se pueden nivelar las pendientes, drenar los suelos o modificar los niveles de pH con la aportación de fertilizantes. En aras de la igualdad de condiciones, la idea es que no sea necesaria ninguna alteración de la tierra cuando ésta sea etiquetada como adecuada. Esta idea está siendo apoyada por la subvención agroforestal, ya que menciona que "idealmente, los sitios deben contener suelos minerales de libre drenaje y no deben tener necesidad de drenaje adicional o de fertilizantes adicionales para el crecimiento de los árboles" (Teagasc, 2020b).

#### 2.4. Base de datos espacial

En total, se han utilizado siete conjuntos de datos para crear los mapas de idoneidad (Tabla 2.1). Además, se ha utilizado un conjunto de datos de cobertura del suelo para responder a la pregunta de investigación 2. El conjunto de datos de la cubierta del suelo se descargó de CORINE Land Cover 2018 del Programa Copernicus (2020) y tiene una resolución de 100 m. Se descargó un modelo digital de elevación (DEM) del Estado de México (1 arco-seg) de la Shuttle Topography Mission (SRTM) (Aún está por ver el uso del insumo de CEM (15m) INEGI), del que se derivan los mapas de altitud y

pendiente (NASA, 2020). Los mapas de temperatura media anual y precipitación media anual se descargaron de las variables bioclimáticas de del INECC con una resolución de 30 arc-sec.

Las variables utilizadas que se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación son BIO1 (temperatura media anual) y BIO12 (precipitación media anual). Los datos utilizados para crear el mapa de velocidad del viento del Estado de México se descargan del WorldClim (2020). La velocidad del viento se midió a una altura de 10 m. En cuanto a los mapas de suelos, se utilizaron dos fuentes de datos de INEGI (2007) a una escala de 1:250 000. Para el pH del suelo se utilizaron las cuadrículas globales del ISRIC (2020) a una profundidad de 0 a 5 cm, con una resolución de 250 m. Para los demás parámetros del suelo, se ha utilizado edición del Mapa Nacional de Suelos de México del Sistema de Información de Suelos de México (INEGI, 2007). Este mapa tiene datos vectoriales a escala 1:250.000. Los polígonos representan diferentes tipos de suelo (un total de 37), a los que se unen otros parámetros del suelo: drenaje, textura y profundidad a la roca madre.

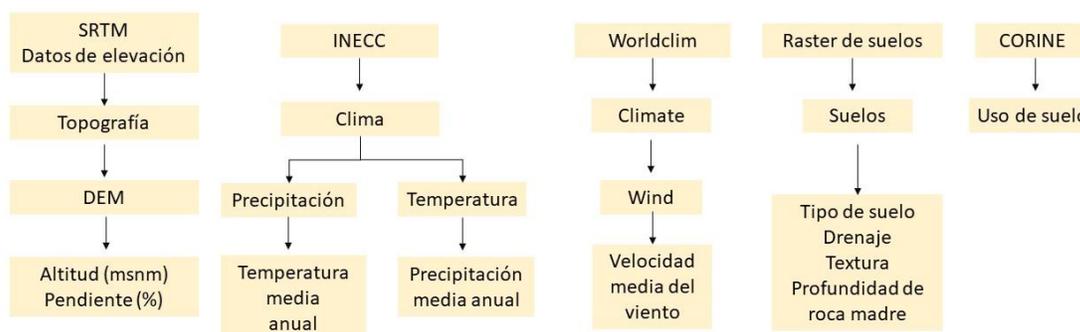
Los programas utilizados para preparar y analizar los mapas son Google Earth Engine y ArcGIS. En ArcGIS se editaron los mapas para que tuvieran el mismo sistema de coordenadas proyectadas, el mismo tamaño de píxel y la misma extensión, que son requisitos previos para su uso en QUICKScan. Para ello, los datos vectoriales se transformaron en datos ráster. El sistema de coordenadas proyectadas elegido es la cuadrícula UTM Zona 14 (UTM 14 N). El tamaño de los píxeles se fijarán en 100 (X) por 100 (Y), es decir, 100 m. Las capas de mayor resolución se han muestreado en sentido descendente mediante un método de agregación media. Las capas de menor resolución se han muestreado con el método del vecino más cercano.

La base de datos espacial utilizada estaba integrada por capas rasterizadas Geotiff:

1. Propuesta de insumos para realizar la investigación.

ID	Datos	Unidades	Resolución espacial	Fuente
1	Modelo Digital de Elevación (DEM)	msnm	30m	INEGI
2	Indice de Aridez		30 m	
3	CORINE uso de suelo		100 m	
4	Temperatura del aire máxima mensual	°C	30 segundos	INECC
5	Temperatura superficial (SENTINEL 3 SLSTR Level 2 LST)	Kelvin	1 km	Copernicus
6	Periodo de crecimiento	Días	30m	
7	Periodo sin heladas	Días	30m	

Los datos mensuales de temperatura máxima se adquirieron de la base de datos del INECC (INECC, 2017). Los datos de temperatura histórica que contiene la climatología modelada 1950-200 para el período con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km) se obtuvieron de la página del WorldClim. Tres imágenes correspondieron a los datos de Land Surface Temperatura Sentinel 3, estas fueron obtenidas en formato SLSTR Level-2 LST de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>) y fueron tomadas en julio de 2020.



## 2.2. Diagrama de insumos

### 2.4.1. Procesamiento previo

Los datos DEM, CORINE land use / land cover, y LST fueron estandarizados en ArcGIS a otros datos preliminares usando la misma proyección, Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) con el elipsoide GRS80 y remuestreo a 30 metros por el algoritmo del vecino más cercano. Los archivos raster

descargados fueron corregidos geoméricamente a coordenadas geográficas comunes, convertidos a °C y exportados a formato GeoTIFF

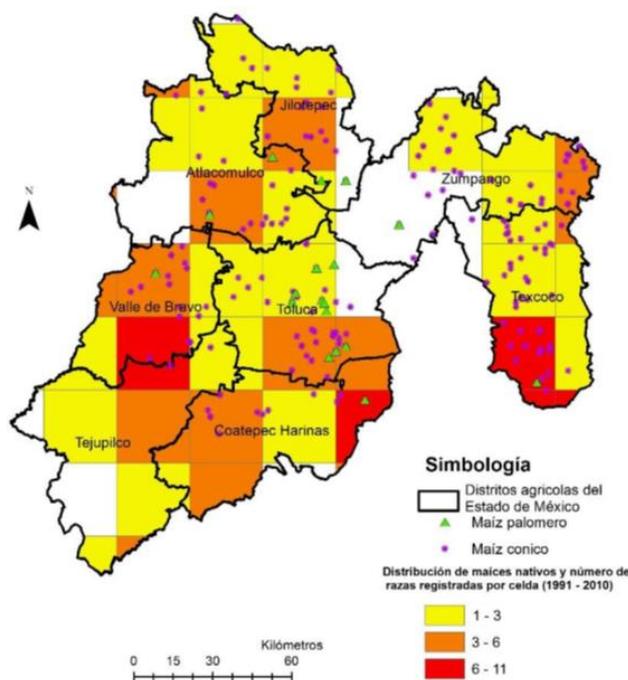
#### **2.4.2. Objeto de estudio: maíz y cebada**

El maíz (*Zea mays*) es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas. Es un organismo dioico<sup>1</sup> que depende completamente del ser humano para poder dispersar sus semillas. A partir de un importante cúmulo de evidencias arqueológicas, por la presencia de poblaciones vivas de maíz y de una enorme diversidad de razas, se sugiere que México es el centro de origen y domesticación del maíz (CIMMYT 2007). En México, la mayoría de los productores de maíz (75-80%) destinan su cosecha principalmente al autoconsumo (microproductores), comercializando sus excedentes en mercados locales (Delgado et al. 2008).

Este tipo de agricultores son los que se encargan de sembrar y conservar las razas de maíz (Paczka 2007). Prácticamente 3 millones de personas trabajan en el cultivo del maíz, equivalente a más del 40% de la fuerza de trabajo del sector agrícola o cerca de un ocho por ciento del total de la fuerza laboral de México. Estas cifras equivalen a unos 18 millones de personas (UNAM, 2007; SAGARPA, 2008). Las instituciones gubernamentales mexicanas registran dos objetivos para la producción de este cereal (grano y forraje).

El estado de México se caracteriza por tener un relieve diverso hecho que diversifica las variedades de maíz, tomando en cuenta que en las zonas más altas con 2000 a 3000 msnm predomina en la mayoría de los municipios del estado la raza Cónico en todas sus variantes, seguida por la raza Elotes cónicos, Chalqueño y Cacahuacintle, ya en menor proporción las razas Palomero Toluqueño, Celaya, Ancho, Bolita, Cónico Norteño y pepitilla (CONABIO, 2011).

La razón por la que se ha elegido el maíz y la cebada para el análisis de este caso es que es el primero muy apreciado por ser uno de los principales granos del país para la dieta alimenticia de los mexicanos y el segundo porque el Estado de México es uno de los principales productores de cebada. El maíz es un grano que se utiliza a menudo en los sistemas agroforestales templados del estado de México, que tradicionalmente conlleva en la agricultura de milpa. El maíz también se menciona como opción principal para la subvención agroforestal para el gobierno mexicano pero principalmente para lograr la seguridad alimentaria en el Estado.



### 3. Distribución de los maíces nativos y número de razas registradas (1991-2010). grafía tomada de Jasso (2019)

El maíz, es uno de los principales cultivos que son la base de la alimentación de la población mundial. El maíz es el cultivo más sembrado en todo el mundo y de mayor consumo por la población (FAO, 2011).

El maíz (*Zea Mays*), también conocido como maíz blanco, pertenece a la familia de las gramíneas. Según un estudio, los límites septentrionales de su presencia natural se encuentran en el centro de Polonia y en el centro de Alemania (Martinsson, 2001). Sin embargo, es muy probable que su presencia natural esté distorsionada porque desde hace siglos el cerezo silvestre es objeto de un uso humano frecuente (O'Brien Horticulture, 2020). Su fruto se consume en todo el mundo, y su madera es muy solicitada para chapas, muebles, paneles y suelos (Martinsson, 2001; Coello et al., 2013; Den Herder et al., 2015). Además, es un árbol ornamental que suele plantarse por su temprana floración (Coello et al., 2013). Las flores y los frutos también son conocidos por su alto valor para la biodiversidad: las flores proporcionan una fuente de néctar y los frutos son consumidos por muchas aves y mamíferos (O'Brien Horticulture, 2020).

**Año:** 2000

**Producción Agrícola**

**Ciclo:** Otoño - Invierno

**Modalidad:** Riego + Temporal

**Cultivo:** Maíz grano (ton)

**Entidad Federativa:** México

	Entidad	Municipio	Superficie (ha)			Producción	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor Producción (miles de Pesos)
			Sembrada	Cosechada	Siniestrada				
1	México		461	461	0	1,374.50	2.98	2,344.63	3,222.70
<b>Total</b>			<b>461</b>	<b>461</b>	<b>0</b>	<b>1,374.50</b>	<b>2.98</b>	<b>2,344.63</b>	<b>3,222.70</b>

**Año:** 2000

**Producción Agrícola**

**Ciclo:** Primavera - Verano

**Modalidad:** Riego + Temporal

**Cultivo:** Maíz grano (ton)

**Entidad Federativa:** México

	Entidad	Municipio	Superficie (ha)			Producción	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor Producción (miles de Pesos)
			Sembrada	Cosechada	Siniestrada				
1	México		588,001.00	582,806.50	5,194.50	1,756,335.83	3.01	1,430.53	2,512,485.43
<b>Total</b>			<b>588,001.00</b>	<b>582,806.50</b>	<b>5,194.50</b>	<b>1,756,335.83</b>	<b>3.01</b>	<b>1,430.53</b>	<b>2,512,485.43</b>

**Año:** 2020

**Producción Agrícola**

**Ciclo:** Primavera - Verano

**Modalidad:** Riego + Temporal

**Cultivo:** Maíz grano (ton)

**Entidad Federativa:** México

	Entidad	Distrito	Superficie (ha)			Producción	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor Producción (miles de Pesos)
			Sembrada	Cosechada	Siniestrada				
1	México	Toluca	97,354.78	97,354.78	0	444,410.05	4.56	4,895.79	2,175,737.19
2	México	Zumpango	43,176.75	28,617.75	14,559.00	65,972.54	2.31	4,038.92	266,457.88
3	México	Texcoco	33,369.09	33,369.09	0	125,665.46	3.77	3,928.38	493,661.96
4	México	Tejupilco	47,907.98	47,907.98	0	99,943.16	2.09	5,508.22	550,508.51
5	México	Atlacomulco	147,412.00	147,412.00	0	631,021.67	4.28	5,004.18	3,157,748.44
6	México	Coatepec Harinas	32,595.01	32,595.01	0	130,349.86	4	3,712.60	483,937.12
7	México	Valle de Bravo	43,397.00	43,397.00	0	147,865.23	3.41	3,742.88	553,441.47
8	México	Jilotepec	51,079.00	51,079.00	0	149,744.91	2.93	4,132.73	618,855.55
<b>Total</b>			<b>496,291.61</b>	<b>481,732.61</b>	<b>14,559.00</b>	<b>1,794,972.88</b>	<b>3.73</b>	<b>4,624.22</b>	<b>8,300,348.12</b>

**Año:** 2020

**Producción Agrícola**

**Ciclo:** Otoño - Invierno

**Modalidad:** Riego + Temporal

**Cultivo:** Maíz grano (ton)

**Entidad Federativa:** México

	Entidad	Distrito	Superficie (ha)			Producción	Rendimiento (udm/ha)	PMR (\$/udm)	Valor Producción (miles de Pesos)
			Sembrada	Cosechada	Siniestrada				
1	México	Tejupilco	73.5	73.5	0	178.43	2.43	4,453.35	794.61
2	México	Coatepec Harinas	284.03	284.03	0	1,132.67	3.99	3,552.57	4,023.89
3	México	Valle de Bravo	46.5	46.5	0	140.56	3.02	4,179.36	587.45
<b>Total</b>			<b>404.03</b>	<b>404.03</b>	<b>0</b>	<b>1,451.66</b>	<b>3.59</b>	<b>3,723.98</b>	<b>5,405.95</b>

El maíz requiere un clima relativamente cálido, con agua en cantidades adecuadas. La mayoría de las variedades del maíz se cultivan en regiones de temporal, caliente y subtropical húmedo, no se adaptan a regiones semiáridas. El granizo y las heladas afectan considerablemente su cultivo. De acuerdo a la agenda técnica del Estado de México (SAGARPA, 2015) dice que las condiciones adecuadas para el cultivo de maíz son las siguientes:

Temperatura °C	PH	Suelos	Clima	Altitud (msnm)	Pendiente (%)
12 a 30	5.5 y 7.8	ranco profundo con un buen drenaje	Templado	600-2,800 (msnm)	1 a 15%

## 2.5. Definición de los umbrales

La metodología consistió en determinar el valor umbral de la temperatura máxima en los dos meses más cálidos de julio y agosto a partir de la documentación científico-técnica. Criterio considerado el

### Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México

umbral de temperatura utilizado para la definición de las zonas restringidas por su alta temperatura, se sabe que no hay período de vegetación durante el verano, ya sea por la cantidad insuficiente de precipitaciones, así como por una gran cantidad de energía solar irradiada (calor), por lo que las plantas se ven obligadas a suspender el ciclo de vegetación. En las zonas norte del Estado de México, los valores máximos del promedio de temperaturas pueden ascender a más de 38°C por mes, solo en los dos meses más cálidos del año, julio y agosto. Asimismo, el déficit hídrico es más pronunciado en la región del Pánuco.

La temperatura del suelo es un factor importante para el desarrollo de los cultivos. Por lo tanto, es muy importante observar la duración (frecuencia) consecutiva de la temperatura del suelo que es superior a un determinado umbral crítico para el desarrollo de las plantas. La región del Lerma-Chapala es extremadamente vulnerable debido al estrés térmico para los cultivos en el umbral crítico de 35 °C en la capa superior del suelo. Además, es importante tener en cuenta que la temperatura del suelo suele ser entre 5 y 10 °C superior a la temperatura del aire en la capa superior del suelo. Así, la zona de vulnerabilidad debida a una temperatura máxima del aire de 30 °C coincide con la zona de vulnerabilidad debida a una temperatura máxima del suelo superior a 35 °C, lo que demuestra que las temperaturas del suelo están muy relacionadas con las temperaturas

Las imágenes de datos de LST de las fechas tomadas en julio de 2021 se segmentaron mediante un umbral de 35 °C y se interceptaron para identificar las áreas comunes que registraron esos valores de temperatura. Se utilizó para identificar la temperatura del aire correlativa correspondiente en los datos de temperatura máxima mensual. Por lo tanto, se calculó la media de la temperatura máxima del aire de julio y agosto como representante del mes más cálido. Se clasificó en dos clases: restringida y no restringida por los 27. 68 °C. El resultado segmentado se filtró mayoritariamente utilizando un kernel de 3 x 3 que considera 8 píxeles vecinos, esta tarea fue necesaria para evitar píxeles aislados. Después, se realizó una reproyección y un redimensionamiento para que este resultado coincidiera con los datos normalizados.

Por otro lado, la clasificación de la altitud se hizo según la distribución estadística de los datos altimétricos y las principales unidades geomorfológicas del relieve del Estado de México, se analizaron los valores de altitud derivados del MDE a través del histograma de frecuencias y en base a ello se definieron nuevos valores de clase para agruparlos en cinco clases. Las demás variables mantuvieron los umbrales utilizados anteriormente y los nuevos valores numéricos asignados a cada

variable y sus categorías, se definieron por reclasificación para mejorar la descripción cualitativa de cada zona agroclimática.

## **2.6. Análisis de idoneidad de los cultivos en condiciones de secano**

El conocimiento de los lugares naturalmente adecuados para el cultivo en particular es una base para apoyar una gestión más eficaz de los recursos naturales y planificación de la agricultura sostenible. La cartografía de la idoneidad agrícola mediante sistemas de información geográfica permite hacer coincidir espacialmente los requisitos y/o las limitaciones de los cultivos con las características agroclimáticas, características agroedáficas y del terreno para apoyar el desarrollo de sistemas de producción más eficientes.

En el caso del Estado de México, donde la productividad agrícola es baja en relación con Estados del país, la idoneidad de los cultivos puede contribuir a conseguir un aumento sostenible de la productividad. Un análisis del subsector del maíz en Estado México, en el Plan de Desarrollo Estatal (2017) se identificó la necesidad de una estrategia regionalizada de estrategia de producción agrícola para marcar claramente las regiones/subregiones que tienen la mayor idoneidad para el cultivo de especies como el maíz y para la producción florícola. Esta regionalización se considera esencial para aumentar el rendimiento, la calidad y la diversificación hacia especies menos representadas. En este contexto, el análisis de idoneidad para el maíz se realizó utilizando la plataforma de datos espaciales. Por medio de la combinación de los requisitos agronómicos específicos de los cultivos para definir las zonas más adecuadas para la producción de maíz.

## **2.7.. Modelos de Circulación General (MCG)**

El objetivo de esta sección es mostrar las proyecciones en las condiciones bioclimáticas en la superficie agrícola de temporal frente a escenarios de cambio climático y su posible impacto en la disponibilidad hídrica para agricultura de riego. Para esto en 2017, el INECC realizó un análisis para evaluar el desempeño regional de los Modelos de Circulación General, a través de un periodo histórico específico, con el fin de obtener elementos que le permitieran observar la reproducción de procesos atmosféricos más importantes para la Nación, ya que estos modelos si bien pueden tener buena representación en una región, pueden no tener un buen desempeño en otra, por eso es recomendable utilizar más de un MCG, más de una proyección futura, y diferentes forzamientos, los

cuales son dados por las Trayectorias de Concentraciones Representativas llamadas RCP por sus siglas en inglés. (INECC, 2017).

## 2.8. Forzamientos radiativos y horizontes futuros

De manera reciente se han desarrollado nuevos escenarios de cambio climático en México para elaborar el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC para la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

Los parámetros establecidos en los forzamientos radiativos suponen un cambio en las radiaciones netas ( $W/m^2$ ), las cuales en conjunto conforman las rutas de concentración representativas, en inglés *Representative Concentration Pathways* (RCP) para la elaboración de escenarios referidos a la radiación climática global, que representan un cambio en las radiaciones netas derivado del aumento o mantenimiento de las emisiones históricas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para desarrollar proyecciones de las concentraciones futuras..

Los nuevos escenarios se denominan RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, los cuales se refieren al posible aumento global del desbalance de energía radiativa entrante y saliente, expresado en  $W/m^2$ . Por ejemplo, RCP8.5 es el escenario más extremo, que supone un desbalance de  $8.5 W/m^2$  (Eguiarte et al S/F) para el año 2100 debido al aumento de gases de efecto invernadero (Cavazos et al., 2013). Ante la evidente necesidad de efectuar estudios regionales para conocer los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en el estado de México, la determinación de los impactos de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para el futuro cercano y la integración de escenarios de adaptación.

Los principales escenarios RCP son 4.5 (emisiones bajas) y 8.5 (emisiones altas), en ambos se considera el posible incremento de emisiones para años futuros, generando como resultado un aumento en la variabilidad climática, lo cual causaría diferentes impactos en las variables climáticas analizadas y a los sectores que se mantienen y se desarrollan en el territorio del Estado de México. Para efectos del presente documento, los RCP utilizados corresponden a los antes mencionados y en tres horizontes: futuro cercano, medio y lejano. Donde permitió calcular el cambio potencial en las variables de la ecuación de balance hídrico bajo supuestos establecidos por el operador; es decir,

admite introducir escenarios de cambio climático, desarrollo de medidas de adaptación y políticas públicas.

El período climático de referencia original de los MCG es el de 1961 a 2000. Como se ha indicado, los correspondientes incrementos de cambio se obtuvieron de Fernández et al. Sin embargo fueron regionalizados al referirlos a la climatología generada con datos regionales observados en el período 1961 a 2000. Para este trabajo se seleccionaron cuatro Modelos de Circulación General (MCG) del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5, 2017), propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC, 2012).

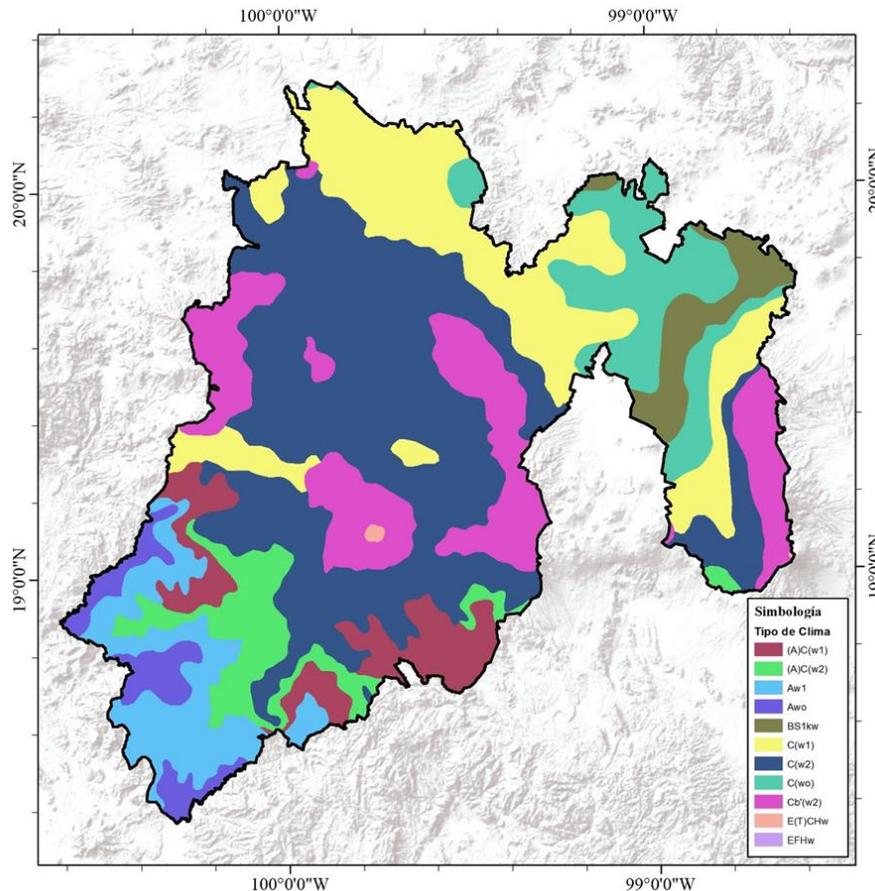
Para las finalidades de esta investigación se utilizará el Modelo MPI\_ESM\_LR con un forzamiento radiativo de 8.5 w/m<sup>2</sup> (escenario pesimista) y un horizonte de tiempo 2075-2099. Es importante considerar que estos mapas no son predicciones, únicamente se mostrará los cultivos que se verán beneficiados a través del desarrollo de la agricultura de riego de acuerdo a las proyecciones de cambio climático en las zonas agrícolas de México.

Modelo	Institución	País
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma)	Canadá
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	Francia
CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GISS_E2_R	NASA Godard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Estados Unidos
HADGEM2_ES	Met Office Hadley Center (MOHC)	Reino Unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLem5a_1r	Institute Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia

MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (Tokyo University), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC_ESM_CH EM	Atmosphere and Ocean Research Institute (Tokyo University), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (Tokyo University), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MPI_ESM_LR	Max Plank Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NCC_NorESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega
REA	INECC (IMTA, CCA-UNAM, CICESE)	México

### Distribución climática

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García para un periodo, la mayor parte de la superficie Estado de México pertenece al tipo climático C, un clima lluvioso moderadamente cálido. La parte más cálida es al norte del estado en la región del Panuco la cual se llega a presentar con veranos cálidos subhúmedos, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Mientras que las zonas agrícolas de la cuenca del Balsas tienen un clima moderadamente cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. El clima moderadamente cálido y húmedo con semicaldo subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Los veranos lluviosos prevalecen en la mayor parte del Estado de México. Solo la región del Balsas corresponden al tipo A y en la región de la cuenca del valle de México se observa al tipo climático B semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C.



2.4. Mapa de distribución de climas del Estado de México. Fuente: Elaboración de INEGI.

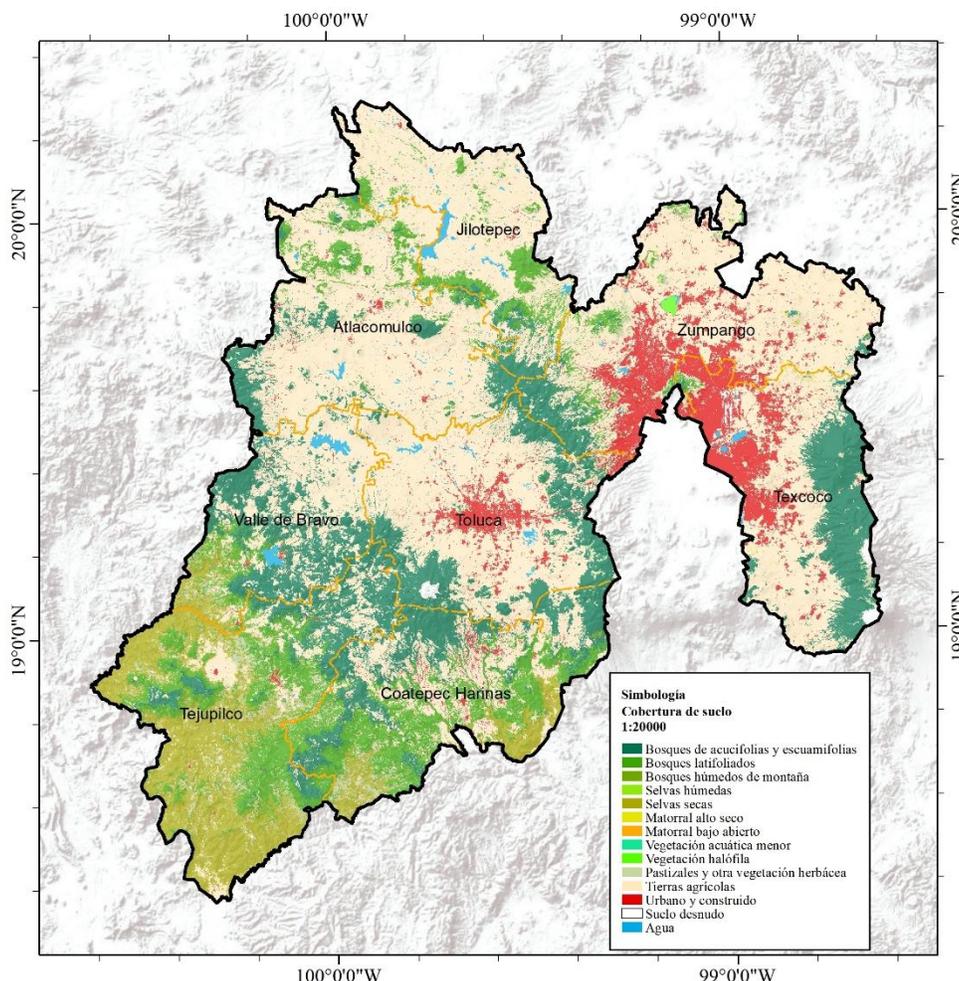
#### Distribución espacial de cobertura de uso de suelo

La información de uso de suelo y vegetación fue subsanada por los datos geográficos generados del programa MAD MEX. El cual, en el marco del programa REDD+ (Reduce Emissions from Deforestation and forest Degradation), México se comprometió al desarrollo de un sistema robusto a nivel nacional para el monitoreo de los datos de actividad. Para este fin se propone el uso del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) y productos satelitales de percepción remota. La correcta clasificación de la cobertura de suelo así como los cambios en la misma son un insumo de vital importancia en el estudio de los datos de actividad. Dadas las dimensiones del país, es necesario un método automatizado para el procesamiento de semejante cantidad de información. Es en este contexto que surge el sistema MAD-Mex (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program). El propósito

es brindar la posibilidad de procesar las grandes cantidades de datos involucrados en un lapso de tiempo razonable.

En este sentido, para el Estado de México se utilizó el material de 14 clases de cobertura, generado en el 2018 por medio de las imágenes de satélite Sentinel 2, en la cual la cobertura más representativa son tierras agrícolas las cuales ocupan el 50.14% del territorio estatal, le sigue los bosques acucifolias y escumifolias con un 18% de cobertura y los bosques latifoliados con 11.46%.

<b>Clases</b>	<b>Coberturas</b>	<b>Superficie (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje estatal (%)</b>
1	Bosques de acucifolias y escumifolias	4060.51	18.18
2	Bosques latifoliados	2560.50	11.46
3	Bosque húmedo de montaña	7.74	0.03
4	Selvas húmedas	0.00	0.00
5	Selvas secas	1811.54	8.11
6	Matorral alto denso	16.20	0.07
7	Matorral bajo abierto	1.22	0.01
8	Vegetación acuática menor	0.50	0.00
9	Vegetación halófila	15.85	0.07
10	Pastizales y otra vegetación herbácea	610.49	2.73
11	Tierras agrícolas	11200.58	50.14
12	Urbano y construido	1656.95	7.42
13	Suelo desnudo	76.34	0.34
14	Agua	208.07	0.93



5. Mapa de cobertura de suelo. Fuente: Elaboración propia con base en el programa MAD-MEX

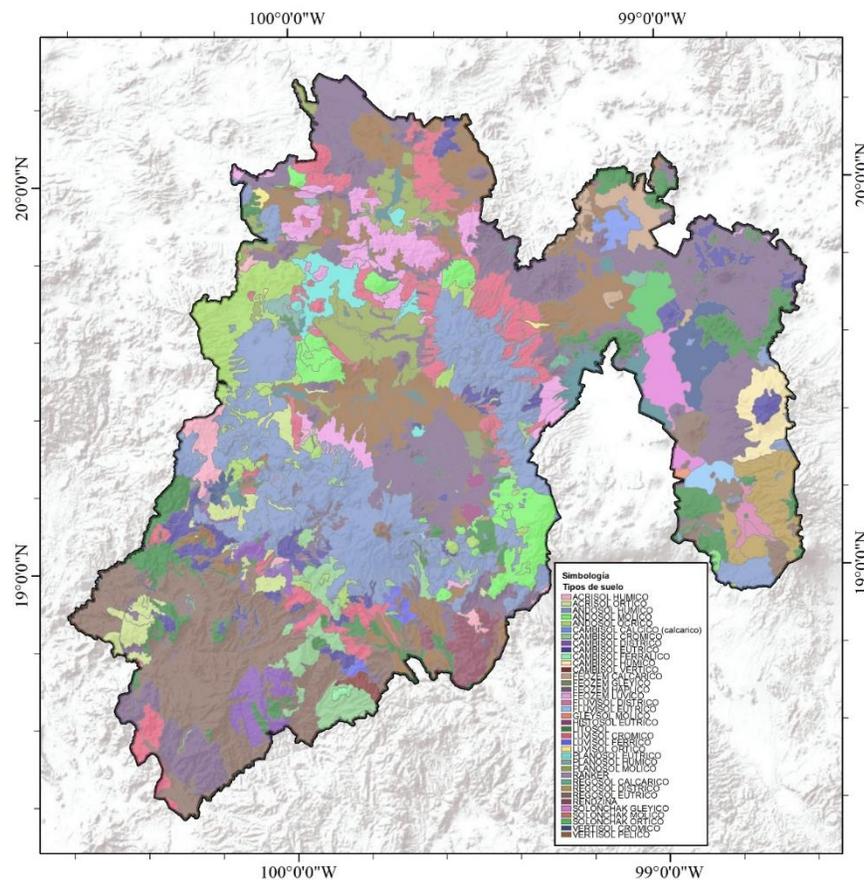
### Distribución edafológica

En el Estado de México los tipos de suelo más representativos son el Feozem, el Cambisol, Andosol.

Tipo de suelo	Superficie (km <sup>2</sup> )	% respecto al Estado
Acrisol	535.26	2.3961972
Andosol	1532.64	6.86114025
Cambisol	1487.06	6.65706585
Feozem	2492.15	11.1565489
Fluvisol	185.52	0.83050639
Regosol	701.06	3.13843203
Vertisol	945.12	4.23097613
Fluvisol	185.52	0.83050639

## Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México

Litosol	564.73	2.52812891
Luvisol	1187.50	5.31604727
Rendzina	29.23	0.13083463

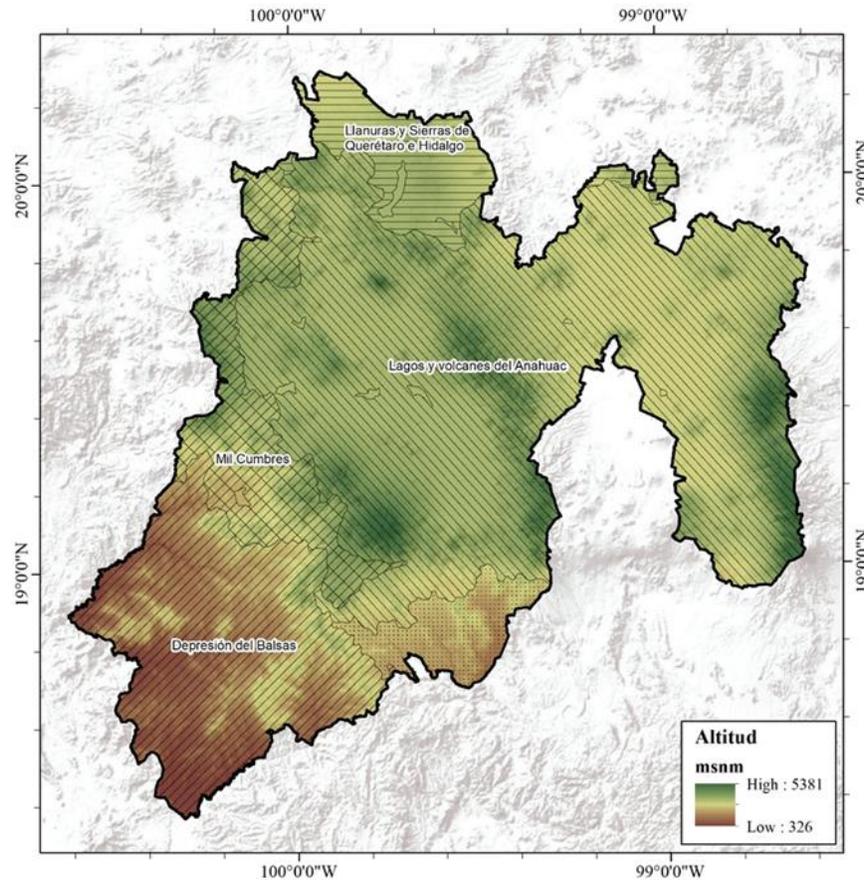


1.6. Mapa de tipo de unidades edafológicas. Fuente: Elaboración propia con base e

### Distribución altitudinal

La altitud en todo el estado varía de 326 a 5381 msnm. Las zonas más altas se localizan el noreste del estado de México, distinguidas por las cercanías al volcán Popocatepetl y la montaña del Iztaccíhuatl, por otra parte a los alrededores del centro del estado otro de los puntos más altos es en las aproximaciones del volcán Nevado de Toluca. Se puede decir que a partir del Nevado de Toluca, al Sur del estado la altitud desciende, fisiográficamente se le identifica como la depresión del Balsas. Al norte del estado se localizan las llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo. Los Lagos y Volcanes del Anáhuac corresponden a más del 50% del estado de México lo cual cubre del centro al noreste.

### Proyecto Adaptación al cambio climático a través de la gestión hídrica destinada a la agricultura en el Estado de México

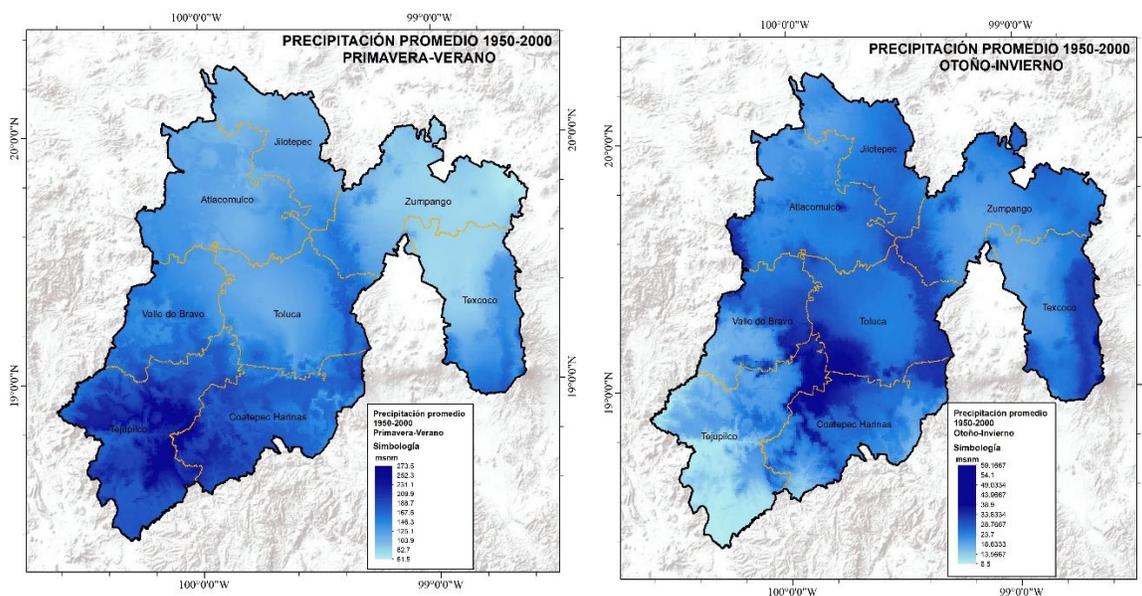


2.7. Mapa de altitud y subregiones fisiográficas del Estado de México.

### 3. Resultados

#### 3.1. Precipitación y temperatura máxima durante el periodo histórico (1950-2000)

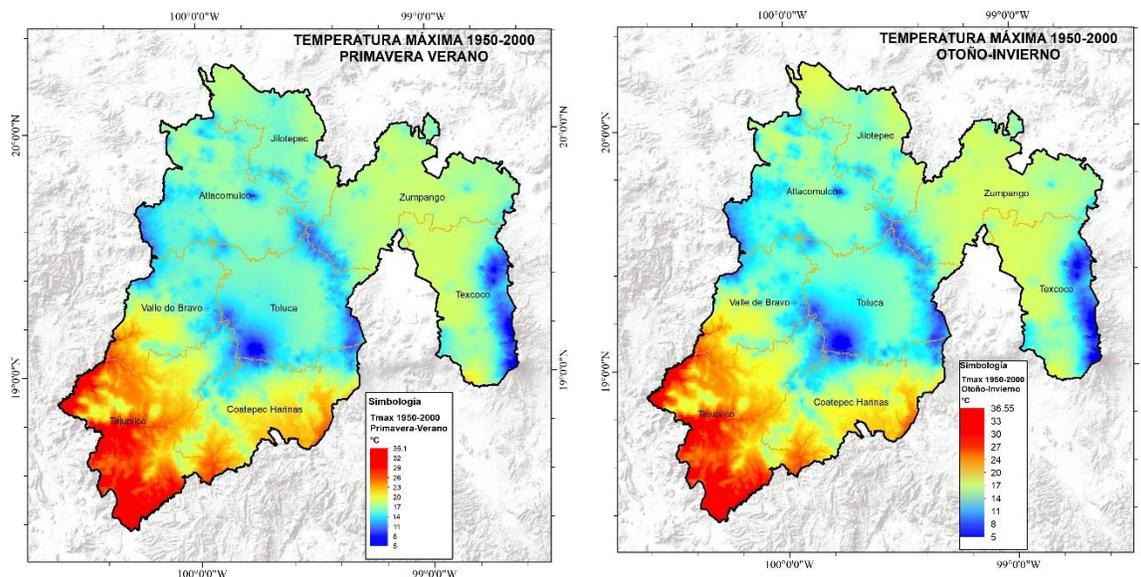
La cartografía base del periodo de 1950 al 2000 se utilizó para estimar el promedio de las variables de temperatura máxima y de precipitación. Respecto a la precipitación en este periodo, se presenta una oscilación con valores mínimos de 61.5 a 272.5 mm en todo el estado. En la figura 2.8, se puede observar que los valores más bajos de precipitación se distribuyen entre las regiones agrícolas de Zumpango y al norte de Texcoco durante el periodo primavera-verano. Durante el periodo de otoño invierno, los niveles de precipitación fluctúan de 59.1 mm a 8.5 mm en todo el Estado de México. Se puede observar que para esta temporada la distribución espacial de las lluvias cambia y en particular se concentran en la región de Tejupilco, la zona sur de la región de vale de Bravo y al oriente de la región agrícola de Coatepec Harinas. En este sentido, los valores más altos de precipitación se concentran a los alrededores del volcán Xinantecatl en donde se ven influenciadas la región agrícola de Toluca, al noroeste de Coatepec Harinas, al noreste de Valle de Bravo, así como en el corredor de la sierra de las Cruces, al norte de la región de Toluca y Sur de la región de Zumpango; así también como en las aproximaciones del volcán Popocatepetl y del Iztaccíhuatl.



3.1. Precipitación promedio para el periodo histórico 1950-2000. A la izquierda se puede observar la distribución de precipitación acumulada para la temporada primavera verano y a la derecha la distribución para el periodo otoño invierno.

Respecto a la temperatura máxima en el periodo base, se puede observar en la figura 3.2 que durante la temporada primavera verano, las temperaturas oscilan entre 5 a 35.1°C respecto a todas las temperaturas del Estado. En este sentido, se puede observar que la concentración de temperaturas más altas se presenta en la región agrícola de Tejupilco, así como al sur de la región de Valle de Bravo y al sureste de la región de Coatepec Harinas. En las regiones de Zumpango y Texcoco también se presentan temperaturas cálidas en promedio de 20°C, con excepción de los alrededores del volcán Popocatepetl y el Iztaccíhuatl en donde se presentan temperaturas menores a los 14°C. Para la temporada de otoño-invierno las temperaturas 1950-2000 oscilan de 36.5°C a 5°C en donde de la misma manera las temperaturas más altas prevalecen en la región de Tejupilco.

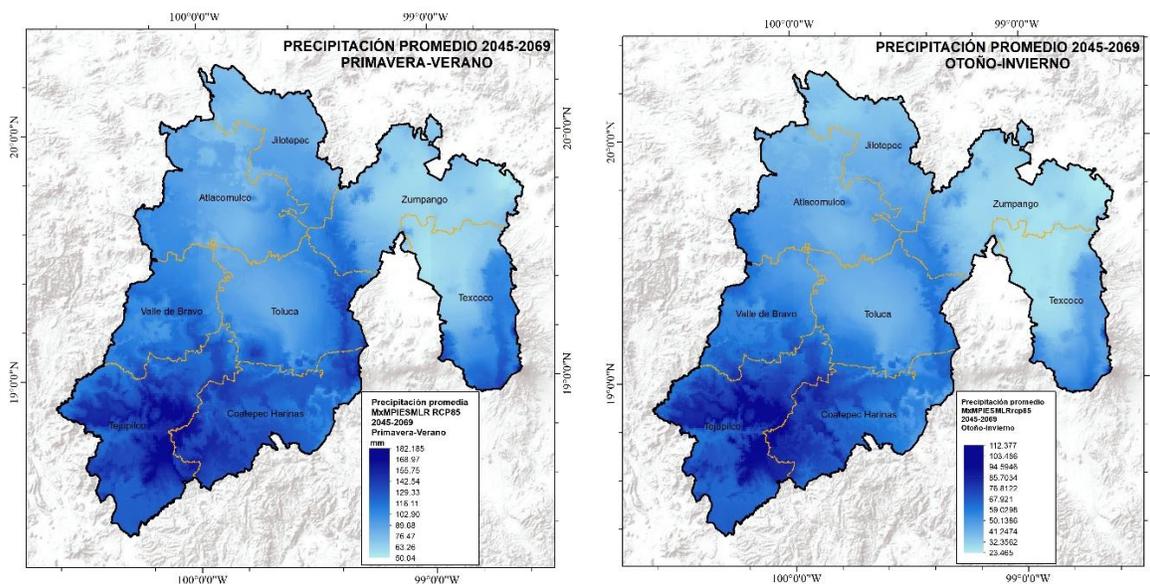
No obstante, en la región de Jilotepec se puede observar una mayor agrupación de temperaturas cálidas a partir de los 20°C. Se puede mencionar que los valores más bajos se concentran en función a la localización de las principales elevaciones del estado de México. En donde a los alrededores del volcán Xinantecatl, la sierra de las Cruces así como en las aproximaciones del Popocatepetl en donde se registran temperaturas menores a los 10°C.



3.2. Temperatura máxima para para el periodo histórico 1950-2000. A la izquierda se puede observar la distribución de la temperatura máxima para la temporada primavera verano y a la derecha la distribución durante la temporada de otoño-invierno.

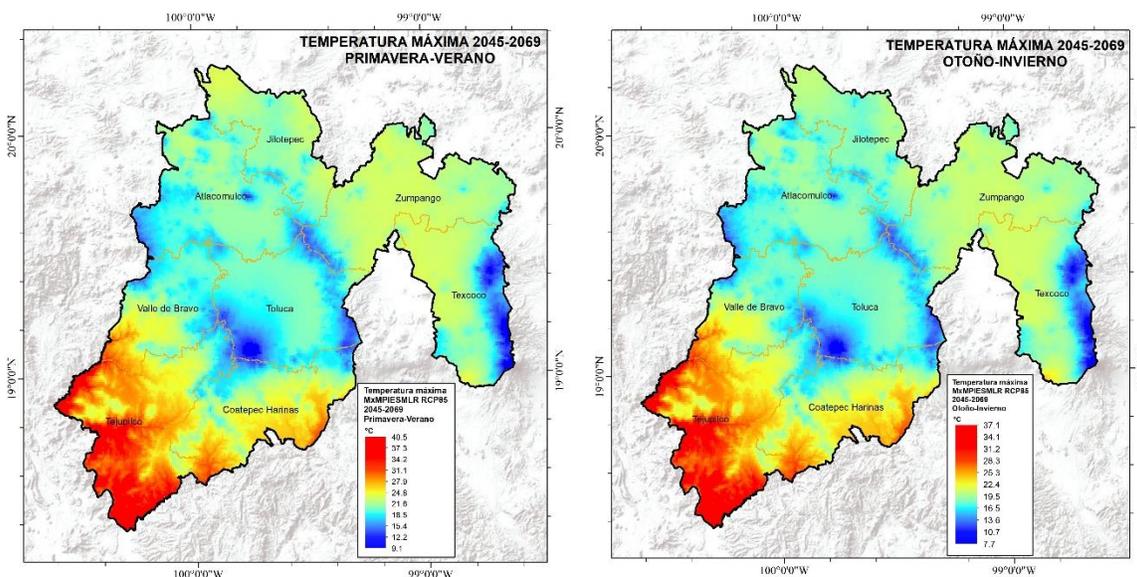
### 3.2. Precipitación y temperatura del Modelo MxMPIESML RCP 85 con horizonte temporal 2045-2069

La cartografía respecto al modelo MxMPIESML con RCP 85 del periodo de 2045 al 2069 se utilizó para estimar el promedio de las variables de temperatura máxima y de precipitación. Respecto a la precipitación de la temporada primavera-verano, se presenta una oscilación con valores mínimos de 50.04 a 182.1 mm en todo el estado. En la figura 3.2, se puede observar que los valores más bajos de precipitación se distribuyen entre las regiones agrícolas de Zumpango y al norte de Texcoco así como en la zona centro de la región de Toluca. Durante el periodo de otoño invierno, los niveles de precipitación fluctúan de 23.4 mm a 112.37 mm en todo el Estado de México. Se puede observar que para esta temporada la distribución espacial de las lluvias se concentran en la región de Tejupilco, la zona sur de la región de valle de Bravo y al oriente de la región agrícola de Coatepec Harinas. En este sentido, los valores más altos de precipitación se concentran a los alrededores del volcán Xinantecatl en donde se ven influenciadas la región agrícola de Toluca, al noroeste de Coatepec Harinas, al noreste de Valle de Bravo, así como en el corredor de la sierra de las Cruces, al norte de la región de Toluca y Sur de la región de Zumpango; así también como en las aproximaciones del volcán Popocatépetl y del Iztaccíhuatl



3.3. Precipitación promedio para el modelo MPIESMLR RCP 85 2045-2069. A la izquierda se puede ver la distribución de precipitación acumulada para la temporada primavera verano y a la derecha la distribución para el otoño invierno.

Respecto a la temperatura máxima en el periodo base, se puede observar en la figura 3.4 que durante la temporada primavera verano, las temperaturas oscilan entre 9.1 a 40.5 °C respecto a todas las temperaturas del Estado. En este sentido, se puede observar que la concentración de temperaturas más altas se presenta en la región agrícola de Tejupilco, así como al sur de la región de Valle de Bravo y al sureste de la región de Coatepec Harinas. En las regiones de Zumpango y Texcoco también se presentan temperaturas cálidas en promedio de 22°C, con excepción de los alrededores del volcán Popocatepetl y el Iztaccíhuatl en donde se presentan temperaturas menores a los 15°C. Para la temporada de otoño-invierno las temperaturas oscilan de 37.1°C a 7.7 °C en donde de la misma manera las temperaturas más altas prevalecen en la región de Tejupilco. Como diferencia entre los ciclos se puede observar una diferencia de aproximadamente 3°C entre valores máximos así como una diferencia de 1.4 °C de temperaturas mínimas.



11. Temperatura máxima promedio para el modelo MPIESMLR RCP 85 2045-2069. A la izquierda a distribución de la temperatura máxima para la temporada primavera verano y a la derecha la distribución de la temperatura máxima para la temporada otoño-invierno.

### **3.3. Estadísticas promedio de temperatura máxima y precipitación entre el modelo base y el modelo MxMPIESML**

#### **3.3.1. Precipitación**

Con base en el análisis espacial de las variables de precipitación y temperatura máxima de la cartografía base correspondiente al periodo 1950-2000 y al modelo MxMPIESML RCP 85 del horizonte 2045-2069 por región agrícola, se obtuvieron los valores promedio y las diferencias en los parámetros que podrían presentarse en las regiones. Por ende, para la precipitación durante el ciclo de primavera verano, la región de Tejupilco es la que presenta mayor cantidad de precipitación (196.29mm) sin embargo podría presentarse una disminución de 61.21 mm respecto a la cantidad de precipitación resultante para el modelo del 2045-2069. El valor más bajo de precipitación para el año base se registra en la región agrícola de Zumpango con (96.93 mm), sin embargo la disminución que presentaría esta región para el 2045-2069 sería de 23.84 mm. En general, durante la temporada primavera verano se prevé una reducción en la cantidad de precipitación que oscilaría entre el 22 al 31% a nivel estatal. Si bien la región agrícola de Texcoco sería la que presentaría menor reducción de precipitación (-22%).

En la temporada de Otoño-Invierno, el modelo base registra valores de 18 a 28.37 mm en donde la región agrícola de Tejupilco presenta los valores mínimos de precipitación y la región de Toluca presenta los mayores valores. Para el modelo del 2045-2069 la precipitación oscilaría de 34.52 mm a 74.60 mm, con la menor presencia de lluvias en la región de Zumpango y la mayor cantidad en la región de Tejupilco. En este sentido, para esta temporada se presentarían un incremento en la cantidad de lluvias respecto al año base, en donde para la región de Tejupilco se prevé un incremento de 314.5 %. La región que se verá menos impactada sería la región de Zumpango. No obstante, regiones como Coatepec Harinas y Valle de Bravo son regiones que se verán impactadas significativamente por los incrementos de precipitación en esta temporada.

Precipitación Promedio (mm)									
ID	Región agrícola	Primavera-Verano				Otoño- Invierno			
		1950-2000	2045-2069	Delta	%	1950-2000	2045-2069	Delta	%
1	Zumpango	96.93	73.09	-23.84	-24.6	23.37	34.52	11.15	47.7
2	Texcoco	109.50	85.43	-24.07	-22.0	24.52	38.02	13.51	55.1
3	Tejupilco	196.29	135.08	-61.21	-31.2	18.00	74.60	56.60	314.5
4	Atlacomulco	119.54	88.44	-31.10	-26.0	23.78	43.70	19.92	83.8
5	Coatepec Harinas	177.78	128.56	-49.22	-27.7	26.23	66.45	40.22	153.4
6	Valle de Bravo	147.69	107.49	-40.20	-27.2	24.51	57.03	32.52	132.7
7	Jilotepec	112.07	83.80	-28.27	-25.2	23.87	39.49	15.62	65.4
8	Toluca	132.55	100.62	-31.92	-24.1	28.37	48.47	20.10	70.8

### 3.3.2. Temperatura máxima

Si bien, otra de las variables utilizadas son la temperatura máxima promedio en los diferentes periodos de análisis. Con base a esto, la temperatura máxima promedio en primavera-verano oscila para el periodo base entre 19.34 a 28.31°C. El donde los valores máximos se registran en la región de Tejupilco y los valores mínimos en la región de Toluca. Por otra parte, el modelo 2045-2069 prevé temperaturas máximas que oscilan entre 24.23°C para la región de Toluca hasta 33.46°C para la región agrícola de Tejupilco. En general se presenta un incremento de temperaturas del 4.8°C a 5.8°C entre cada uno de los modelos. La región agrícola que podría presentar un mayor cambio en la temperatura es la región de Jilotepec con un incremento del 25.3% respecto a la temperatura de la cartografía base, así como la región de Atlacomulco que podría llegar a presentar incrementos de 25.4% de temperatura máxima durante la temporada de primavera verano. Por otra parte, la temporada de otoño-invierno al extraer los valores promedio de cada uno de los modelos, estos registraron los mismos valores, en este sentido se puede determinar que las diferencias se pueden observar en los valores máximos y mínimos lo cual se puede verificar en la cartografía generada.

Temperatura Máxima Promedio (°C)									
ID	Región agrícola	Primavera-Verano				Otoño- Invierno			
		1950-2000	2045-2069	Delta	%	1950-2000	2045-2069	Delta	%
1	Zumpango	22.24	27.77	5.54	24.91	24.00	24.00	-	-
2	Texcoco	21.06	25.98	4.92	23.37	22.29	22.29	-	-
3	Tejupilco	28.31	33.46	5.15	18.19	29.46	29.46	-	-
4	Atlacomulco	20.41	25.60	5.20	25.46	21.84	21.84	-	-
5	Coatepec Harinas	24.16	29.13	4.97	20.56	25.22	25.22	-	-
6	Valle de Bravo	22.21	27.20	4.99	22.47	23.44	23.44	-	-
7	Jilotepec	21.35	27.19	5.84	27.33	23.40	23.40	-	-
8	Toluca	19.34	24.23	4.89	25.30	20.47	20.47	-	-

#### 4. Conclusiones

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 las reducciones 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 6.4% mostró condiciones adecuadas, ya que el 25.1 y 31.6% indicaron condiciones moderadas y limitadas, respectivamente. Otros estudios como Conde (2004), denominan que dentro de la cuenca del Pánuco y Lerma no existe el potencial para la producción del maíz, sin embargo se considera que dentro de la cuenca del Balsas existe una aptitud mediana para su desarrollo. No obstante es en la Cuenca de Lerma y la del Valle de México en donde se concentra la mayor superficie agrícola del Estado. Para el año 2000 el SIAP (2021) reporta un rendimiento estatal de 3.01ton/ha para el periodo primavera verano sin embargo para el periodo otoño invierno el rendimiento disminuye a 2.98 ton/ha, no obstante para el año 2020 durante primavera verano el rendimiento es de 3.73 ton/ha siendo la región agrícola de Atlacomulco la principal productora de maíz grano. Para la temporada otoño invierno, los rendimientos de maíz se concentran en las regiones agrícolas de Tejupilco, Coatepec Harinas y Valle Bravo en donde la región de Coatepec Harinas es representativa con 3.99 ton/ha.

Los modelos de cambio climático aplicados podrán proporcionar resultados diferentes, derivados de las razones de cambio que cada uno sugiere así como su posible impacto sobre la distribución potencial del maíz. Los posibles impactos sobre la producción de maíz no son constantes entre sí, pero en general el modelo MPI es el que presenta condiciones menos favorables para la producción de maíz, en función del incremento de temperatura sobretodo en la región agrícola de Atlacomulco. Por otra parte es necesario llevar esta investigación a un mayor detalle en resolución espacial para que este no se reduzca a nivel municipal. 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 (Palma et al., 2007), 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 el país.

## Bibliografía

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, estudios FAO Riego y Drenaje, Vol. 56, FAO, Roma, 2006. p 323

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas*. Suiza: OMM (Organización Meteorológica Mundial).

FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). *Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional: América Latina y el Caribe (gestión del riesgo de desastres en el sector agrícola)*. Santiago, Chile: FAO

PDEM (2018) Plan de desarrollo Estatal del Estado de México 2017 – 2023. Gobierno del Estado de México. Consejo Editorial de la Administración Pública Estatal-

Prager, S., Ríos A., Schiek, B., Almeida., J. y González C. (2020) Vulnerability to climate change and economic impacts in the agriculture sector in Latin America and the Caribbean. Climate Change Division Environment, Rural Development and Risk Management Division. Inter-American Development Bank (111 – 119 pp)

Ruiz, J., Medina, G., Rodríguez, V. Sánchez, J. Villavicencio R., Durán, N., Grageda, J. García G., (2016) Regionalización del Cambio Climático en México. Revista Mexicana de ciencias Agrícolas, Num 13, 2451-2464.

Sánchez, J.M., Serrano, M.E., Sangermán, C.M., Navarro, A., Vera, G.R., Cuevas, J.A. y Macías, J.L. (2011). Eventos hidrometeorológicos extremos y desastres en comunidades rurales y urbanas en Motozintla, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (Núm. Especial 2): 167-181

SIAP 2020 Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la producción agrícola <http://www.gob.mx/siap> (Consultado el 14 de julio del 2021)

Estrategia Estatal de Cambio Climático del Estado de México (2016), PINCC, UNAM3 Agenda de Innovación del Estado de México (SF) Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

ONU. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Haan, R. (2020) A GIS-based land suitability analysis for productive growth of wild cherry (*Prunus avium*) on pastures in Ireland. Wageningen University.

IIASA/FAO, 2016. National Agro-economic Zoning for Major Crops in Thailand (NAEZ v4). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy.

Sraka M., Husnjak, S. y Varovic D. (2014) Assesment of the land suitability for apples and hazels growing. Fifth International Scientific Agricultural Symposium Agrosym 2014. DOI 10.7251/AGSY1404688S

Jafarzadeh, A., Alamdari, P., Neyshabouri, M. y Saedi, S. (2008) Land suitability evaluation of Bilverdy Research Station for wheta, Barley, Alfalfa, Maize and Safflower. *Soil & Water Res.*, 3, 2008 (Special Issue 1): S81–S88. *Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, I.R. of Iran*

Lane A y Jarvis.A (2010) Changes in climate will modify the geographphy of crop suitability:agricultural biodiversity can help with adaptation. DOI: 10.1007/978-90-481-3709-1\_20

Mahabadi, Y. Givi,J., Khorasgani, N. MohamaddiJ.y Poch, R. (2012) Land suitability evaluation for alfalfa and barley base don FAO and fuzzy multicriteria aproaches in Irania arid región. *DESERT* 17 (2012) 77-89

Chandra J. (2013) Land suitability assessment for crop cultivation by using remote sensing and GIS. DOI: 10.5539/jgg.v5n3p65 *Journal of Geography and Geology*; Vol. 5, No. 3; 2013

Sarmadian, F. (2014) Support Vector Machines Based-Modeling of Land Suitability Analysis for Rainfed Agriculture