

Pérdida de superficies cultivadas de maíz de temporal por efecto de heladas en el valle de Toluca

Maricarmen Jasso-Miranda¹

Jesús Soria-Ruiz^{2§}

Xanat Antonio-Némiga¹

¹Facultad de Geografía-Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, México. CP. 50110. (mjassomiranda@gmail.com; xanynemiga@hotmail.com). ²Laboratorio de Geomática-Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Carretera Toluca-Zitácuaro, Zinacantepec, Estado de México. CP. 52176. (jsoriar@yahoo.com).

§Autor para correspondencia: soria.jesus@inifap.gob.mx.

Resumen

La producción de maíz en el Estado de México es de gran importancia, no obstante; este cultivo es afectado por algunos elementos del clima, principalmente por heladas. En el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca (DRRT) por su ubicación y altitud, se registran de forma recurrente periodos frecuentes de heladas, que inhiben el crecimiento, desarrollo y la madurez fisiológica del maíz. El objetivo de este trabajo fue, analizar el comportamiento geoespacial de las heladas en el cultivo del maíz de temporal del ciclo agrícola primavera- verano 2019 en el DDRT. Con herramientas de Sistemas de Información Geográficas y de percepción remota, se determinaron las causas y los efectos que este fenómeno provoca al cultivo del maíz en el Valle de Toluca. Para ello, se realizó un monitoreo del Índice de Vegetación Normalizado de la Vegetación (NDVI) y un análisis de las temperaturas mínimas; todo ello para identificar el periodo con heladas que provocaron pérdidas en 3 511 ha de maíz. Se aplicaron técnica estadística para determinar que la altitud, temperatura mínima y frecuencia de días fríos están relacionadas con la manifestación de las heladas. Estas variables en su conjunto permitieron identificar áreas susceptibles con diferentes niveles de riesgos de heladas en el área de estudio.

Palabras clave: *Zea mays* L., área siniestrada, desastres naturales, Estado de México, temperaturas congelantes.

Recibido: diciembre de 2021

Aceptado: febrero de 2022

Introducción

La República Mexicana es afectada año con año por diferentes fenómenos meteorológico, algunos de ellos impactan a la población de forma directa como los huracanes y heladas, que causan daños severos. El fenómeno de la helada según su intensidad puede afectar a la población de las zonas rurales. En el norte y centro de la República Mexicana, durante los meses fríos del año (noviembre-febrero), se presentan temperaturas menores de 0 °C debido al ingreso de aire polar continental, generalmente seco y que proviene del norte (CENAPRED, 2021).

Las variaciones de los ciclos estacionales del clima, con respecto a la normal, se traducen en pérdidas parciales o totales de los cultivos, ya que estos son vulnerables a las heladas, las cuales ocurren cuando la temperatura del aire desciende hasta formar cristales de hielo en el interior de las células vegetales durante un periodo de tiempo; el proceso de deterioro de las plantas depende del estado vegetativo en que se encuentre y de la especie a la que pertenece (FAO, 2010).

La susceptibilidad a las heladas genera estrés abiótico que perjudica el crecimiento y producción de las plantas (Chinnusamy *et al.*, 2007), en especial el cultivo de maíz que es sensible a las bajas temperaturas (Restrepo *et al.*, 2013) y la irregularidad en los cambios diurnos de la temperatura pueden inhibir el desarrollo de las fases del cultivo, desde la siembra, floración y madurez, ya que las plantas no son capaces de mantener su temperatura constante (Rawson *et al.*, 1998).

Por otro lado, la severidad del daño a los cultivos por heladas está aumentando (Granados y Sarabia, 2013), y la vulnerabilidad es mayor en el cultivo del maíz de temporal, así como decrementos en las superficies sembradas y disminución en su rendimiento (Granados y Sarabia, 2013).

A nivel nacional, las regiones más afectadas por heladas son la Mesa Central del Altiplano, la Sierra Madre Occidental en los estados de Chihuahua y Durango, así como en las Sierras Tarahumara, Sierra de Durango y Tepehuanes. Además, en las partes altas del Sistema Volcánico Transversal sobre el paralelo 19° latitud norte, esencialmente en los estados de México, Puebla y Tlaxcala se registran temporadas con más de 100 días al año con heladas (CENAPRED, 2001). Las heladas tempranas que ocurren a principios de septiembre en el centro de México provocan daños considerables a la agricultura del ciclo primavera-verano y en el noroeste de México a cultivos del ciclo otoño-invierno (O-I), cuyas pérdidas son considerables.

Como ejemplo se puede mencionar las heladas severas registradas en 2011 en el estado de Sinaloa, con pérdidas mayores de 95% en hortalizas y cultivos anuales (Soria-Ruiz *et al.*, 2012). Durante los años recientes, cerca de 260 000 ha cultivadas de maíz son afectadas anualmente por bajas temperaturas (CONAGUA, 2013), principalmente en altitudes superiores a los 2 200 m. El Distrito de Desarrollo Rural Toluca (DDRT) que se ubica en esta región, se registran temperaturas muy bajas durante el invierno y parte del verano, influidas por su altitud que atrae las masas de aire frío que constantemente favorecen el proceso de heladas en esta región.

Respecto al área de estudio, es importante mencionar que el Estado de México en 2019 reportó una superficie agrícola de 667 709 ha, que representó 29% de superficie del territorio, de las cuales 71.2% fueron con maíz de grano (SIAP, 2019). El DDRT representa para la entidad, el segundo Distrito de Desarrollo Rural con mayor volumen de producción de maíz, con un promedio de 113

102 ha de superficie sembrada (SIAP, 2015), cuyo rendimiento promedio es de 3.5 t ha⁻¹ por debajo de la media estatal. Esto se debe en parte a la limitada capitalización, falta de créditos, incremento de los costos de producción y las heladas que se registran en las fases de desarrollo y llenado de grano del cultivo, las cuales afectan el rendimiento y la calidad del grano cosechado.

La presente investigación tuvo como objetivo realizar un análisis espacial para medir la pérdida de superficie de maíz de temporal por efecto de heladas, con técnicas de percepción remota y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través de las relaciones espaciales entre la superficie de maíz afectada por heladas y las variables que las provocan. Esto con la finalidad de una mejor gestión del cultivo en la toma de decisiones en el sector rural del Valle de Toluca, Estado de México.

Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación estuvo conformado por tres etapas: a) el análisis de los registros de temperaturas mínimas para identificar el periodo de heladas; b) superficies afectadas de maíz a partir de imágenes de satélite antes y después de las heladas; y c) las relaciones espaciales entre las variables territoriales (climáticas y ambientales) que inciden en la ocurrencia de las heladas.

Área de estudio

El área de estudio comprende el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca (DDRT), uno de los ocho DDR del Estado de México. Se localiza en el centro-este del Estado de México entre los paralelos 19° 00' y 19° 35' de latitud norte y entre los meridianos: 99° 54' y 99° 14' de longitud oeste, con altitudes que entre 1 800 y 4 640 msnm (Granados y Sarabia, 2013). Cuenta con una superficie de 302 604 ha y está conformado por 24 municipios. Se caracteriza por sus valles fértiles con suelos profundos (Figura 1). El trabajo de investigación se realizó durante el ciclo agrícola primavera-verano (P-V) de 2019.

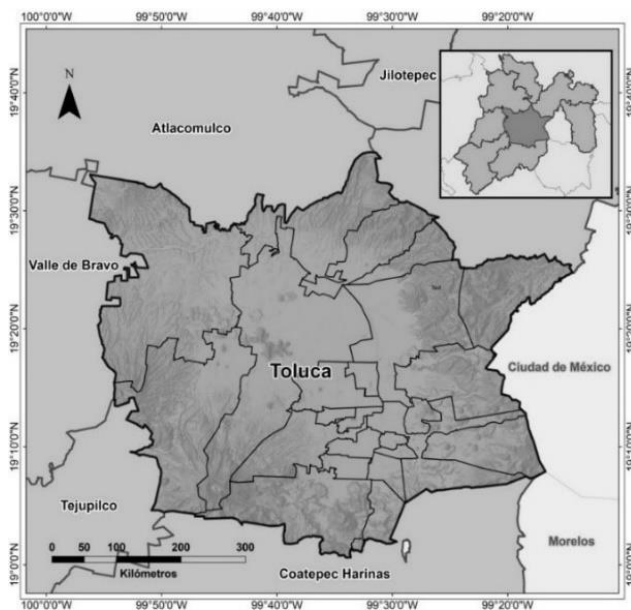


Figura 1. Ubicación geográfica del Distrito de Desarrollo Rural Toluca.

En el DDRT se cultivan bajo condiciones de temporal 132 784.9 ha (Cuadro 1) y aporta en promedio 22% del volumen de producción de maíz en la entidad; sin embargo, en esta región se registran más de 100 días con heladas al año, influidas por la altitud, la cual propicia heladas recurrentes que afectan la producción de maíz en esta región. En orden de importancia, los municipios que reportan mayor superficie sembrada de maíz de temporal en el DDRT son Almoloya de Juárez, Toluca, Zinacantepec, Tenango del Valle, Lerma y Temoaya (SIAP, 2014), tal como se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Superficie sembrada de maíz de temporal por municipio en el DDRT al 2019.

	Municipio	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)
1	Almoloya de Juárez	29 646.1	25 526.1
2	Toluca	18 724.2	16 614.2
3	Zinacantepec	12 392	12 032
4	Tenango del Valle	11 063.2	11 063.2
5	Lerma	10 751	9 926
6	Temoaya	9 884.22	9 743.57
7	Tianguistenco	7 225.8	7 225.8
8	Calimaya	7 167.25	6 947.25
9	Otzolotepec	7 030	5 995
10	Ocoyoacac	4 756.93	4 756.93
11	Metepc	3 471	3 471
12	Huixquilucan	3 035	3 035
13	Joquicingo	2 715	2 715
14	Xalatlaco	2 617	2 617
15	San Antonio la Isla	2 096	2 096
16	Rayón	1 865.2	1 865.2
17	Xonacatlán	1 842	1 702
18	Capulhuac	1 265	1 265
19	Texcalyacac	1 132.2	1 132.2
20	Mexicaltzingo	768.5	768.5
21	Chapultepec	765.5	765.5
22	Atizapán	570.8	570.8
23	Almoloya del Río	526.2	522.7
24	San Mateo Atenco	429	429

Periodo de heladas

Para identificar las heladas que se presentaron en el DDRT en el ciclo (P-V) y que inciden sobre el ciclo vegetativo del maíz, se tomó como muestra el año 2019 el cual fue un año con registros de más heladas constatadas a través de una previa investigación bibliográfica y del análisis de datos de clima.

Tomando en cuenta que el maíz es susceptible a una amplia gama de temperaturas entre 5 y 45 °C y que, por debajo de los 4 °C, las temperaturas llegan a causar daños al cultivo (Mondragón, 2005). Cuando la temperatura de la planta alcanza temperaturas del punto de congelación del agua, llega a provocar cristales de hielo de forma intracelular en los tejidos, llegando a causar la muerte celular, marchites, órganos reproductores deshidratados, granos chupados, flacidez de frutos y hasta una posible muerte de la planta (FAO, 2010).

Para identificar las temperaturas mínimas menores o iguales a 4 °C ya que por debajo de ese valor afectan al maíz de temporal; se analizaron las temperaturas mínimas diarias por debajo de los 4 °C durante el periodo mayo-octubre, cuyos datos fueron obtenidos de 20 estaciones climáticas ubicadas en el área de estudio (CLICOM, 2019). En seguida se realizaron interpolaciones utilizando el método de la distancia inversa ponderada (IDW) a una potencia de valor 2, un procedimiento determinístico de ponderación por distancia. La interpolación del punto problema se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa Inverse Distance Weighting (IDW). Este procedimiento se realizó desde la plataforma del software ArcGis 10.4®.

Monitoreo del cultivo mediante índices de vegetación

El monitoreo del cultivo de maíz se realizó desde la etapa de crecimiento hasta la madurez fisiológica a partir del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) obtenido mediante el análisis multitemporal de imágenes del satélite MODIS/Terra. Con los valores crecientes y decrecientes de este índice, se identificaron las zonas afectadas por alguna anomalía, principalmente por heladas. La relación entre el NDVI y las fases de desarrollo vegetativo del maíz es alta (Soria y Granados, 2005). El ciclo agrícola P-V del maíz en esta región se presenta de mayo a octubre con diferentes fases de crecimiento: a) el de crecimiento y desarrollo, cuyos valores de NDVI se incrementan; b) de floración y llenado de grano, con mayor vigor vegetal y valores de NDVI superiores a 0.6; y c) el de madurez fisiológica y senescencia, cuyos niveles de NDVI disminuyen rápidamente (Figura 2).

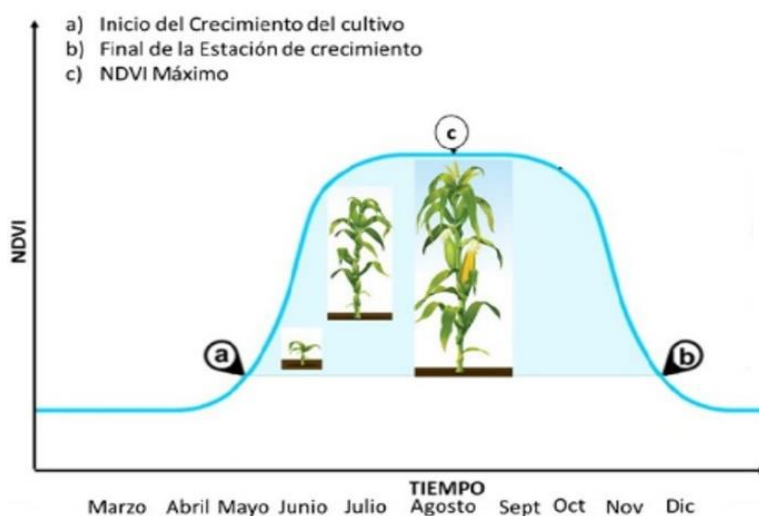


Figura 2. Relación del NDVI y las fases de desarrollo vegetativo del maíz en el valle de Toluca.

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés como el déficit hídrico intraestival o las heladas, su reflectancia será inferior en la región del infrarrojo cercano y rojo del espectro electromagnético. A mayor contraste de las reflectancias entre las bandas del infrarrojo y rojo, el maíz presenta mayor vigor vegetal. Los bajos valores de esta relación indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a coberturas sin vegetación como el suelo desnudo que reporta índices cercanos al cero (Soria *et al.*, 1998).

El NDVI registra valores entre -1 y 1 y es el más utilizado en aplicaciones agronómicas (Granados *et al.*, 2004). Puede establecerse como umbral crítico para coberturas vegetales un valor NDVI de 0.1 y para la vegetación densa y sana de 0.5. Las imágenes MODIS/Terra tienen una temporalidad de 16 días y una resolución espacial de 250 m. En el presente estudio, se analizaron escenas del periodo de mayo-octubre del 2014 que cubrieron todo el DDRT. Para la extracción del NDVI de estas imágenes, se utilizó el software ENVI-Ver. 5.1[®] mediante la siguiente expresión: $NDVI = \frac{R_{Nir} - R_{Red}}{R_{Nir} + R_{Red}}$. Donde: R_{Nir} reflectancias de la radiación en el Infrarrojo cercano del espectro y R_{Red} reflectancias de la radiación del Rojo visible del espectro.

Mediante procedimientos de algebra de mapas, al sobreponer y comparar los mapas de temperatura mínima ($T \leq 4$ °C) con los mapas de NDVI, se logró identificar las zonas con afectaciones por heladas que dañaron el cultivo de maíz de temporal.

Superficie de maíz afectada por heladas

Para cuantificar la superficie de maíz afectada por heladas en el ciclo agrícola P-V 2014, el análisis se realizó en dos etapas (previa y posterior al siniestro). El procedimiento consistió en: se seleccionaron seis imágenes del satélite Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) del año 2019, con porcentaje de nubosidad menor de 15% (USGS, 2019) con resolución temporal de 16 días, y resolución espacial de 15 m (Cuadro 2). Estas imágenes fueron gestionadas desde la plataforma [Landsatlook.usgs.gov/viewer](https://landsatlook.usgs.gov/viewer), las cuales fueron sometidas a procesos de corrección geométrica, radiométrica y atmosférica a través del procesador ENVI[®]. En seguida, se generaron mosaicos de las escenas previamente agrupadas para su análisis (anterior y posterior al siniestro). Se obtuvo una combinación de bandas en falso color (RGB) para resaltar los rasgos de las parcelas de maíz y lograr una mejor discriminación del cultivo.

Cuadro 2. Escenas utilizadas de imágenes de satélite Landsat-8 agrupadas según fecha de toma.

Periodo	Escenas LANDSAT-8	Columna/ renglón	Fecha de adquisición
PVAH	LC08-L1TP-026047-20190726-20170304-01-T1	26/47	26/07/2019
	LC08-L1TP-027046-20190615-20170305-01-T1	27/46	15/06/2019
	LC08-L1TP-027047-20190615-20170305-01-T1	27/47	15/06/2019
PVDH	LC08-L1TP-026047-20191030-20170303-01-T1	26/47	30/10/2019
	LC08-L1TP-027046-20190919-20170303-01-T1	27/46	19/09/2019
	LC08-L1TP-027047-20190919-20170303-01-T1	27/47	19/09/2019

PVAH= periodo vegetativo del maíz antes de las heladas; PVDH= periodo vegetativo del maíz después de las heladas.

Para determinar la superficie cultivada de maíz, las imágenes fueron sometidas a un proceso de clasificación supervisada, que consiste en un ordenamiento de los píxeles en un número finito de clases o categorías, basándose en los valores de niveles digitales, procedimiento que utiliza la intensidad radiométrica de cada píxel. Previamente se seleccionaron y digitalizaron los polígonos conocidos como campos de entrenamiento. En seguida se utilizó el algoritmo de máxima verosimilitud (Maximum likelihood Classification). De la clasificación resultante de los dos periodos, se obtuvo la superficie cultivada (hectáreas) y la distribución espacial del cultivo del maíz antes y después de la helada. En seguida se estimó el cambio de la cobertura de maíz en dos ciclos vegetativos mediante la herramienta Thematic Change Workflow de ENVI®.

Análisis espacial de la superficie de maíz afectada por heladas

Para explicar las relaciones espaciales entre la superficie afectada de maíz y las variables ambientales que tienen mayor incidencia en la manifestación de una helada, se generó un modelo explicativo utilizando métodos geoestadísticos de regresión a nivel de píxel, así como herramientas de SIG. Para ello, se utilizó como variable dependiente la pérdida de cobertura de maíz (superficie afectada de maíz) y cinco variables independientes o explicativas: climáticas (temperatura mínima, frecuencia de días fríos y precipitación) y ambientales (modelo de elevación digital y pendiente del terreno) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Factores climáticos y ambientales que inciden en la manifestación de heladas.

Factores	Variable	Clave	Descripción	Fuente
Climáticos	Temperaturas mínimas	TEM.MIN	Se analizaron las temperaturas mínimas mensuales en el ciclo agrícola P-V 2019 (abril a noviembre)	Clicom de CONAGUA
	Frecuencia de días fríos	FREC.DIAS.FRÍOS	Se analizó el total de días fríos que se presentaron en el ciclo agrícola P-V 2019	Clicom de CONAGUA
	Precipitación	PRECIPT.MM	Registro total de lluvia (mm) en el ciclo agrícola P-V 2019	Clicom de CONAGUA
Ambientales	Modelo de elevación digital	DEM	Altitud del área de estudio (msnm)	INEGI
	Pendiente	SLOP	Pendiente del terreno (%)	INEGI

Los datos de temperatura y la precipitación fueron obtenidas del registro de 20 estaciones climatológicas distribuidas en el área de estudio (Clicom, 2019). Para calcular las temperaturas mínimas, de la base de datos se extrajeron valores a nivel diario de ≤ 4 °C, los cuales se promediaron por mes durante el periodo mayo-octubre en el ciclo P-V 2019. Del resultado de este procedimiento, se estimó el número de veces que ocurrió el evento de heladas ($T \leq 4$ °C) de forma mensual, y así obtener la frecuencia de días fríos. La precipitación acumulada mensual se obtuvo de la base de datos climatológica (Clicom, 2019) para el mismo periodo mayo-octubre.

Los resultados de estas tres variables (Temperatura mínima, frecuencia de días fríos y precipitación) fueron interpolados mediante el método IDW. El modelo de elevación digital se obtuvo directamente de la plataforma del INEGI (2017) y de este producto se derivó el mapa de pendiente del terreno. Para la realización de estos procesos, se utilizó el Software ArcGis®. Todas las variables fueron estandarizadas al sistema de proyección UTM con datum WGS84 y convertidas a formato raster.

Mapa de probabilidad de ocurrencia de heladas

La probabilidad de ocurrencia de heladas en el DDRT para el año 2019, se obtuvo a partir de un modelo de regresión lineal múltiple (RLM) con la herramienta 'Multireg' del software TerrSet, donde se estimaron los coeficientes de cada variable explicativa (ecuación de regresión) y en la conjunción con las cubiertas de los valores de las variable dependiente y explicativas, mediante una calculadora raster, se obtuvo el mapa de probabilidad, el cual representa la probabilidad de que un pixel ocupado por maíz, se pierda por efecto de las heladas. De los valores resultantes, se asignaron rangos (bajo, medio, alto y muy alto).

Resultados y discusión

Periodo de heladas que afectan al cultivo del maíz

En la Figura 3, se muestran los mapas de las temperaturas mínimas mensuales ($<4\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el periodo de mayo a octubre de 2019, mismo periodo que corresponde al ciclo vegetativo del maíz. Se observa que los meses donde se registraron temperaturas por debajo del umbral crítico que afectaron el crecimiento y desarrollo del maíz ($<4\text{ }^{\circ}\text{C}$), fueron mayo y agosto con más de 40% del territorio del área de estudio principalmente en zonas de ladera. En el mes de octubre, se registró la mayor superficie afectada con temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las zonas de montaña que corresponden a la región oeste, noroeste y suroeste del área de estudio.

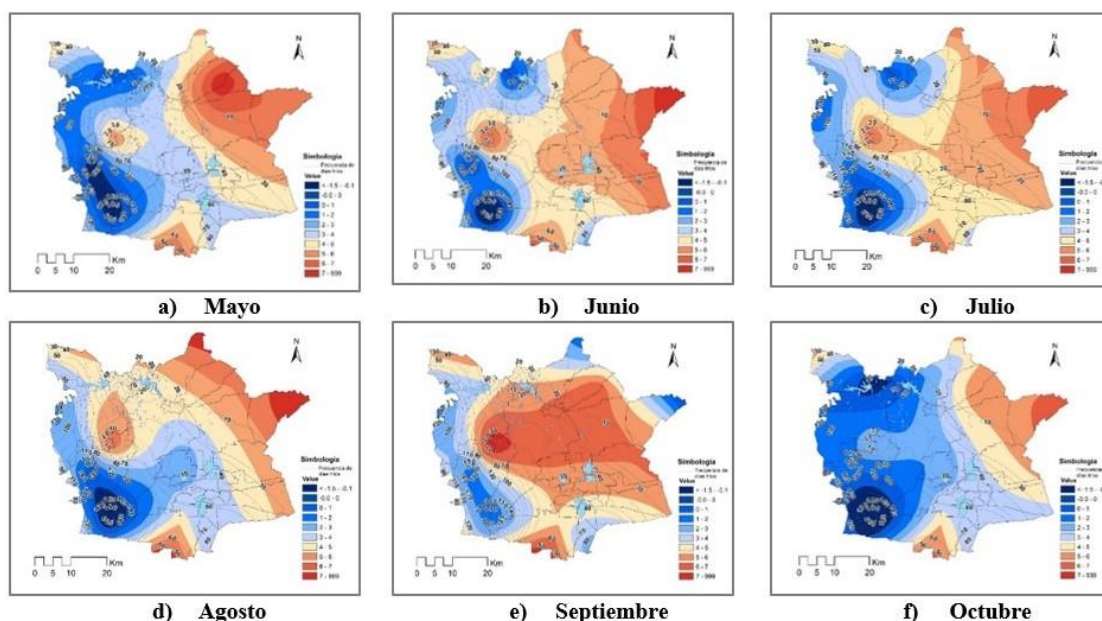


Figura 3. Comportamiento de la temperatura mínima de mayo a octubre en el DDRT.

Los valores mínimos mensuales de temperaturas ($<4^{\circ}\text{C}$) registrados en el área de estudio, afectaron significativamente al cultivo del maíz principalmente en la etapa de crecimiento en algunas zonas. En otras zonas, las heladas coincidieron con la etapa de floración y llenado de grano, etapa en la cual la planta es más sensible a los daños por heladas, repercutiendo en su productividad (Barrales *et al.*, 2002). Al comparar las Figuras 3 y 4, encontramos que la mayor superficie con temperaturas inferiores a 4°C , que se registraron en mayo, agosto y octubre, coinciden con las etapas de emergencia, floración y madurez fisiológica del maíz (Granados y Sarabia, 2013), donde las registradas en agosto causaron más daños ya que el maíz se encontraba en la etapa de floración.

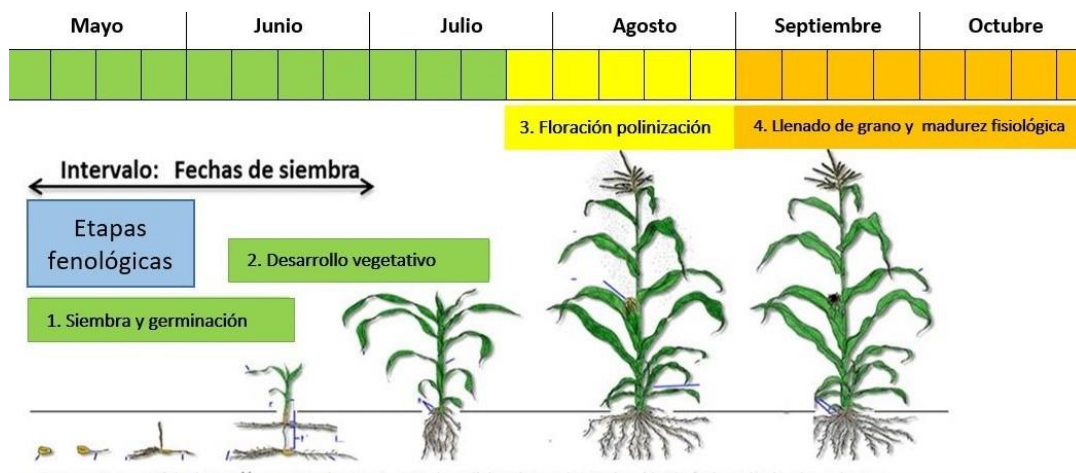


Figura 4. Comportamiento de las etapas fenológicas del cultivo del maíz en el Valle de Toluca.

Índice de vegetación y vigor del cultivo (NDVI)

La variabilidad climática se puede obtener por medio de herramientas de teledetección, para la comprensión de la fenología de los ecosistemas en función de la variación temporal del verdor de la vegetación (Gómez, 2013) por ello, se realizó el monitoreo continuo de la superficie total cultivada de maíz con base en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite MODIS/Terra con una frecuencia de 16 días durante el periodo mayo-octubre, donde se observó el efecto de las bajas temperaturas que provocaron marchitamiento temporal al follaje del cultivo del maíz en el ciclo agrícola P-V 2019.

Como se observa en la Figura 5, los valores del NDVI que indica el índice de verdor; con el álgebra de mapas se pudo identificar la dinámica del comportamiento de esta variable, ya que se incrementa en la primera quincena de septiembre y posteriormente descienden en la segunda quincena del mismo mes, lo que se combina con la presencia de temperaturas inferiores a 4°C incidiendo en el área agrícola de los municipios de Almoloya de Juárez, Zinacantepec, zona sur y norte de Toluca, Temoaya, Huixquilucan, Calimaya y Tenango del Valle.

Estos meses son determinantes para el buen desarrollo del maíz, donde el mes de agosto se expresa el máximo crecimiento y desarrollo vegetativo (floración y llenado de grano) y es donde se obtuvieron valores máximos de NDVI.

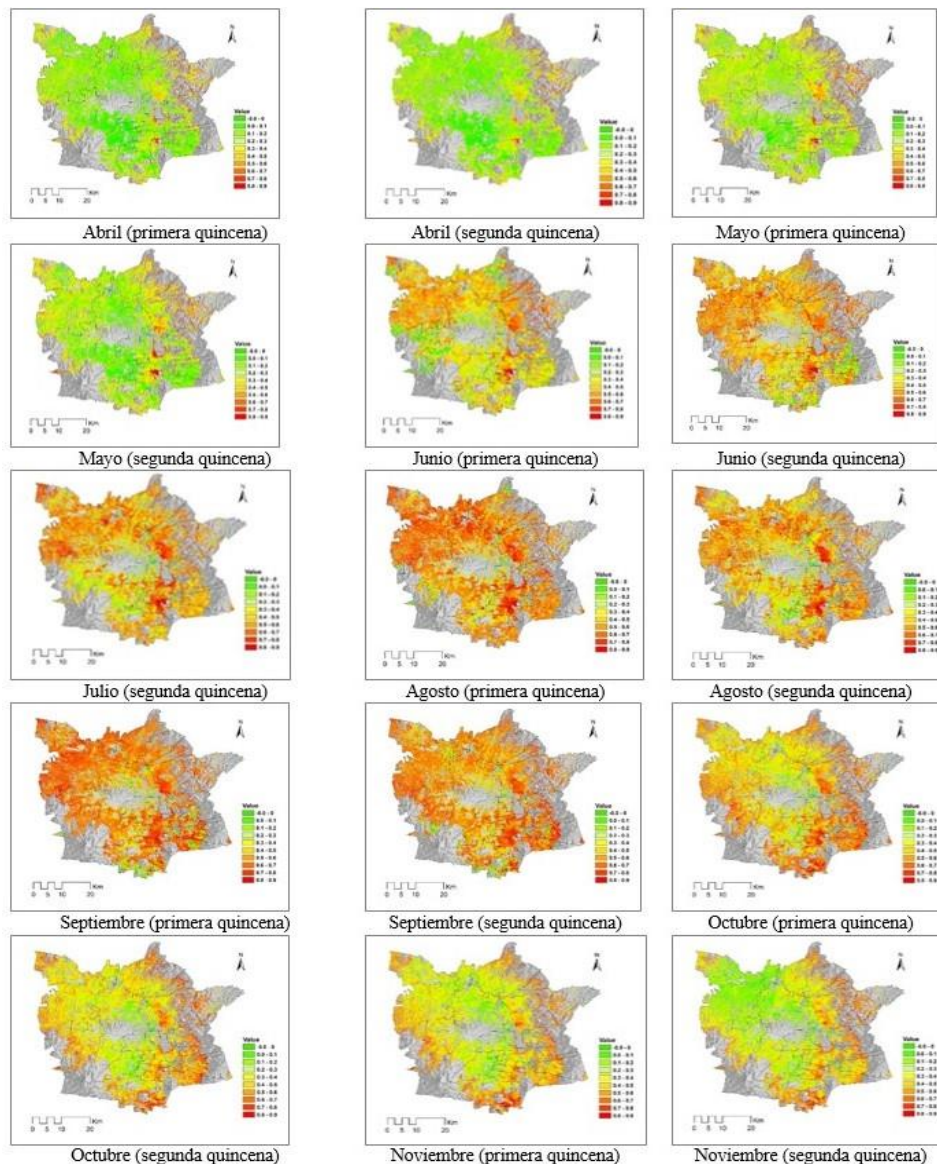
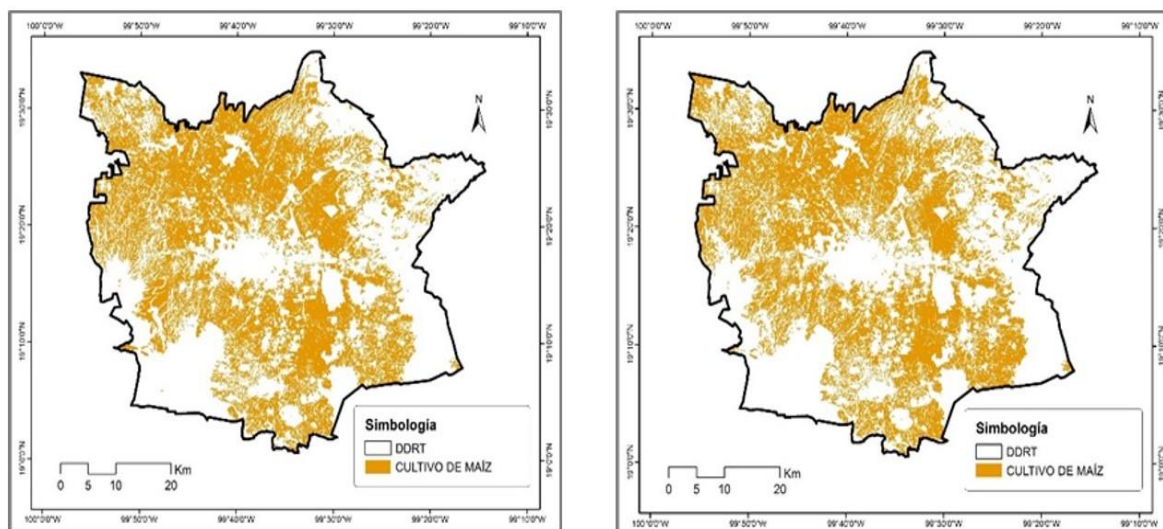


Figura 5. Comportamiento del NDVI a nivel quincenal en las superficies cultivadas de maíz.

Una de las ventajas del monitoreo en los cultivos mediante el NDVI el cual indica el índice de verdor o grado de salud de los cultivos, es que pueden identificar anomalías en el follaje de las plantas. En este caso, se identificó un decremento repentino de los bajos niveles de verdor del maíz en el área de estudio. Mediante sobreposición de los mapas de NDVI (Figura 3) y de temperaturas mínimas mensuales inferiores a 4 °C (Figura 5), se pudo identificar que existe una estrecha relación entre estas dos variables.

Superficie de maíz afectada por heladas

Antes de la helada, la superficie de maíz al mes de julio fue de 126 500.7 ha y después de la helada (agosto-septiembre) la superficie disminuyó a 122 989.15 ha una reducción de 3 511.6 ha que representa el 2.77% (Figura 6).



Superficie de maíz antes de las heladas

Superficie de maíz después de las heladas

Figura 6. Superficie cultivada de maíz antes y después de las heladas.

Los municipios que reportaron mayor superficie afectada por las heladas fueron los siguientes: Almoloya de Juárez con 32%, Zinacantepec con 18% y Tenango del Valle con 9.4%. Con menores superficies afectadas y que reportaron valores inferiores de 0.5% fueron Capulhuac, Oztolotepec, Xonacatlan, San Antonio la Isla, Mexicaltzingo, Atizapán, Chapultepec, Texcalyacac y San Mateo Atenco (Cuadro 4).

Cuadro 4. Superficie de maíz de temporal afectada por heladas en el ciclo agrícola P-V 2019.

No.	Municipio	Superficie afectada (ha)	Extensión (%)
1	Almoloya de Juárez	1 132	32.2
2	Zinacantepec	618	17.6
3	Tenango del Valle	331	9.4
4	Tlanguistenco	249	7.1
5	Xalatlaco	245	7
6	Calimaya	212	6
7	Toluca	179	5.1
8	Ocoyoacac	100	2.8
9	Joquicingo	91	2.6
10	Temoaya	85	2.4
11	Lerma	71	2
12	Rayón	42	1.2
13	Huixquilucan	37	1.1
14	Metepec	32	0.9
15	Capulhuac	17	0.5

No.	Municipio	Superficie afectada (ha)	Extensión (%)
16	Otzolotepec	15	0.4
17	Xonacatlán	13	0.4
18	San Antonio de la Isla	11	0.3
19	Almoloya del Rio	9	0.3
20	Mexicaltzingo	8	0.2
21	Atizapán	5	0.1
22	Chapultepec	4	0.1
23	Texcalyacac	4	0.1
24	San Mateo Atenco	1	0
	Total	3 511	100

Relación helada-superficie afectada de maíz

Al aplicar el modelo de regresión lineal múltiple (RLM), se encontró que algunas variables tienen mayor incidencia en la manifestación de las heladas (Eastman, 2015) y como se observa en el Cuadro 5, la altitud tiene mayor influencia en la ocurrencia de las heladas, seguida por la precipitación y la temperatura mínima. Con menos valor de asociación se encuentran la pendiente del terreno y la frecuencia de días fríos.

Cuadro 5. Concentrado del valor de asociación de las variables utilizadas.

Variable	Valor de asociación (r)	Coefficiente de determinación (%)	Asociación
Altitud	0.516	26.69	Relación positiva
Precipitación	0.503	25.31	Relación positiva
Temperatura mínima	0.484	23.44	Relación positiva
Pendiente del terreno	0.4	16.05	Relación positiva
Frecuencia días fríos	0.281	7.92	Relación positiva baja

Todas las variables tienen una relación positiva, esto significa que, con mayor altitud, menor lluvia, mayor número de días con temperatura mínima, mayor pendiente y frecuencia de días fríos, hay más posibilidades de ocurrencia de heladas.

Mapa de probabilidad de riesgo de heladas

Con el modelo RLM, se estimaron los coeficientes de cada variable explicativa, y mediante la relación que hay entre una variable dependiente (helada) y un conjunto de variables independientes (las variables que provocan una helada): climáticas y ambientales (Pineda *et al.*, 2010). El mapa de probabilidad de riesgo indica la probabilidad de que una superficie mínima de maíz representada en el mapa (pixel) se pierda por efecto de las heladas (Figura 7). Del total de la superficie que se pierde por heladas, la probabilidad obtenida es: con riesgo bajo 96%, riesgo medio 2%, riesgo alto 2% y con riesgo muy alto 0.3%.

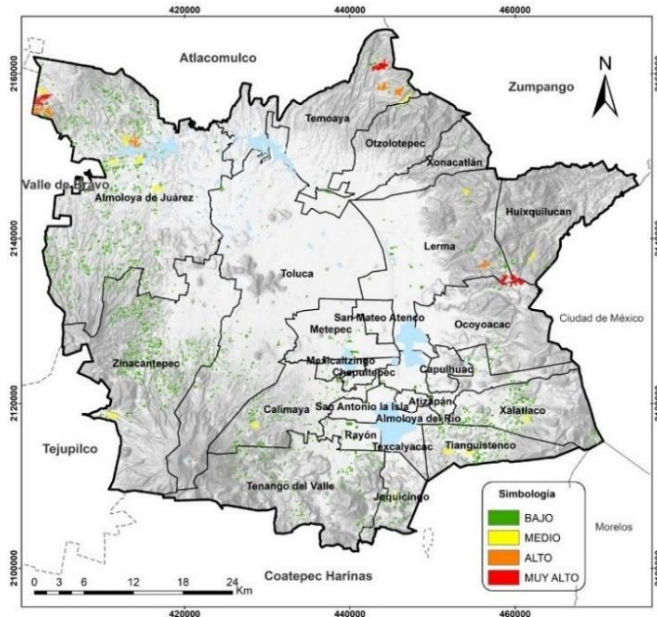


Figura 7. Distribución espacial del riesgo de ocurrencia de helada en el DDRT.

Los niveles de riesgo para cada uno de los 24 municipios que conforman el DDRT se muestra en el Cuadro 6, donde se observa que los municipios con mayor superficie son: Almoloya de Juárez con 1 132 ha (32.2%), Zinacantepec con 618 ha (17.6%), Tenango del Valle con 331 hectáreas (9.4%) y Santiago Tianguistenco con 249 ha (7.1%). En su conjunto estos municipios representan más de la mitad de la superficie con probabilidad de pérdida de maíz por heladas.

El único municipio donde no se manifiesta riesgo de heladas, es San Mateo Atenco. Aquellos municipios con riesgo alto y muy alto conforman una superficie de 65 ha; es decir, 1.8% del total de la superficie estimada de maíz en 2019, las cuales se ubican en el centro y noroeste de Almoloya de Juárez, norte de Temoaya y este de Lerma (Figura 7). Los municipios con diferentes niveles de riesgo de heladas se muestran en el (Cuadro 6).

Cuadro 6. Superficies cultivadas de maíz con probabilidad de heladas. Ciclo agrícola P-V 2019.

Municipio	Superficie con nivel de riesgo de heladas (ha)				Superficie total	
	bajo	medio	alto	muy alto	(ha)	(%)
Almoloya de Juárez	1 057	37	28	10	1 132	32.2
Zinacantepec	617	1			618	17.6
Tenango del Valle	331				331	9.4
Tianguistenco	241	8			249	7.1
Xalatlaco	243	2			245	7
Calimaya	205	7			212	6
Toluca	179				179	5.1
Ocoyoacac	99			1	100	2.8
Joquicingo	88	3			91	2.6

Municipio	Superficie con nivel de riesgo de heladas (ha)				Superficie total	
	bajo	medio	alto	muy alto	(ha)	(%)
Temoaya	59	4	20	2	85	2.4
Lerma	64	2	2	3	71	2
Rayón	42				42	1.2
Huixquilucan	32	5			37	1.1
Metepec	32				32	0.9
Capulhuac	17				17	0.5
Otzolotepec	14	1			15	0.4
Xonacatlán	13				13	0.4
San Antonio la Isla	11				11	0.3
Almoloya del Río	9				9	0.3
Mexicaltzingo	8				8	0.2
Atizapán	5				5	0.1
Chapultepec	4				4	0.1
Texcalyacac	4				4	0.1
San Mateo Atenco	1				1	0
Total	3 375	70	50	16	3 511	100

Conclusiones

Del ciclo agrícola P-V de maíz de temporal del año estudiado 2019, de los meses analizados, en agosto y septiembre se presentaron las heladas más intensas en el Distrito de Desarrollo Rural Toluca (DDRT), con temperaturas por debajo de los 4 °C, lo que provocó la disminución de las superficies de este cultivo estimando en 3 511 ha cuyos municipios más afectados fueron Almoloya de Juárez y Zinacantepec. Las variables que tienen mayor relación en la manifestación de las heladas en DDRT son la altitud, precipitación y temperatura mínima. En el ciclo agrícola primavera-verano de 2019. La mayor probabilidad de ocurrencia de heladas se presentó en los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya, Zinacantepec, Lerma y Ocoyoacac; sin embargo, todos los municipios que componen el DDRT presentaron diferentes niveles de riesgo, y estuvieron expuestos a la pérdida de las superficies cultivadas por el efecto de las heladas durante la etapa de floración y llenado de grano del cultivo del maíz.

Literatura citada

- Barrales, D. J. S.; Livera, M. M.; González, H. V.; Peña, V. C.; Kohashi, S. J. y Castillo, G. F. 2002. Relaciones térmicas en el sistema suelo-planta-atmósfera durante la incidencia del fenómeno de enfriamiento o helada. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(3):289-297.
- CENAPRED. 2001. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie fascículos: heladas. Secretaría de Gobernación. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. ISBN 970-628-614-4.

- Chinnusamy, V.; Zhu, J. and Zhu, J. K. 2007. Cold stress regulation of gene expression in plants. *Trends Plant Sci.* 12(10):444-451.
- CLICOM. 2014. Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>). Servicio Meteorológico Nacional. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México, DF.
- CONAGUA. 2013. Comisión Nacional del Agua. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Reporte anual. DF, México.
- Eastman, J. R. 2015. TerrSet geospatial monitoring and modeling system. Tutorial. Clark University, USA. 69-97 pp.
- INEGI. 2017. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, DF. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>.
- Gómez, M. 2013. La relación entre el índice normalizado de vegetación y la variabilidad del clima en Oaxaca: una herramienta para el manejo de ecosistemas. Centro de Ciencias de la Atmósfera- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 5 p. www.observatoriometeorologicounam.com/articulos/ndvi-igm.doc.
- FAO. 2010. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Protección contra heladas: fundamentos, prácticas y economía. Roma, Italia. 1-49 pp.
- Granados, R. R.; Reyna, T. T.; Gómez, R. G. and Soria-Ruiz, J. 2004. Analysis of NOAA-AVHRR-NDVI Images for Crops Monitoring. *Inter. J. Rem. Sensing.* 25(9):1615-1627.
- Granados, R. R. y Sarabia, R. A. 2013. Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4(3):435-446.
- Mondragón, S. L. 2005. Manual para el cultivo de maíz en sistema a doble hilera. ICAMEX-SEDAGRO. Estado de México. 6 p.
- Pineda, J. N. B.; Bosque, S. J.; Gómez, D. M. y Plata, R. W. 2010. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariada: una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas.* 69:33-52.
- Rawson, R. B.; Cheng, D.; Brown, M. S. and Goldstein, J. L. 1998. Isolation of cholesterol-requiring mutant CHO cells with defects in cleavage of sterol regulatory element binding proteins at Site-1. *J. Biol. Chem.* 273(43):28261-28269.
- Restrepo, H.; Gómez, M. I.; Garzón, A.; Manrique, L.; Alzate, F.; López, J. y Rodríguez, A. 2013. Respuesta bioquímica de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) a diferentes condiciones de temperaturas nocturnas. *Rev. Colomb. Cienc, Hortíc.* 7(2):252-262.
- SIAP. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural (SAGARPA). DF, México.
- SIAP. 2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural (SAGARPA). DF, México.
- SIAP. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). DF, México.
- Soria, R. J.; Fernández, O. Y.; Quijano, C. A.; Macías, C. J.; Saucedo, P.; González, D. and Quintana, J. 2012. Remote sensing and simulation models for crop management. Proceedings of progress in electromagnetics research symposium. Moscow, Russia. ISSN: 1559-9450.

- Soria, R. J.; Ortiz, C.; Islas, F. y Volke, V. 1998. Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Estado de México. Publicación especial 7. 93 p.
- Soria, R. J. y Ganados R. 2005. Relación entre los índices de vegetación obtenido de los sensores AVHRR del Satélite NOAA y TM del Landsat. *Cienc. Ergo Sum.* 12(2):167-174.
- USGS. 2014. United States Geological Survey. LandsatLook viewer. Landsat-8 Project. US. Department of the Interior. USA.