

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROTECNOLÓGICAS



**PÉRIODO LIBRE DE HELADAS PARA EL CENTRO OESTE DEL
ESTADO DE CHIHUAHUA**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA
EN CIENCIAS HORTOFRUTÍCOLAS**

PRESENTA

ARELY JUDITH VASQUEZ MADRID

CUAUHTÉMOC, CHIH., ABRIL 2021

PÉRIODO LIBRE DE HELADAS PARA EL OESTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA

Área de investigación

Agricultura de precisión



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROTECNOLÓGICAS

Los que suscriben, certifican que han leído y recomiendan a la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas la aceptación de la tesis de Maestría titulada: **"PERIODO LIBRE DE HELADAS PARA EL OESTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA"**

Realizada por: **Arely Judith Vasquez Madrid**

Como cumplimiento parcial de los requerimientos para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS HORTOFRUTÍCOLAS**

Ratifican que las firmas son verdaderas:



Dr. Damian Aaron Porras Flores
Director
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas



M.C Ramon Saúl Luján Aguirre
Secretario de Investigación y Posgrado
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas

30 / 5 / 2021

Fecha



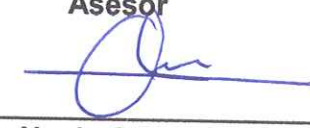
Dr. Oscar Cruz Álvarez
Director de tesis



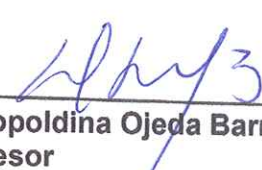
M.C Mario Iván Uc campos
Codirector de tesis



Dr. Juan Luis Jacobo Cuéllar
Asesor



Dra. Nuvia Orduño Cruz
Asesor



Dra. Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios
Asesor



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROTECNOLÓGICAS

The undersigned certify that they have read, and recommend to the Agrotechnological Sciences Department for acceptance, a Master's thesis entitled:
"FROST FREE PERIOD FORTHE WEST OF THE STATE OF CHIHUAHUA"

Submitted by: **ARELY JUDITH VASQUEZ MADRID**

In partial fulfillment of the requirements for the degree of **MASTER OF SCIENCE**

Ratify that signatures are real:



Dr. Damian Aaron Porras Flores
Department Chair
Agrotechnological Sciences Department



M.C Ramón Saúl Luján Aguirre
Chairman of Research and Graduate
Studies
Agrotechnological Sciences Department

30 / June / 2021

Date



Dr. Oscar Cruz Álvarez

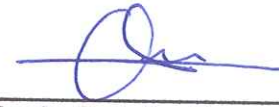
Major professor



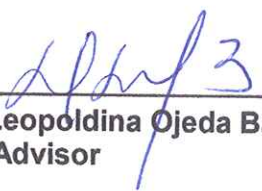
M.C Mario Ivan Uc Campos
Advisor



Dr. Juan Luis Jacobo Cuéllar
Advisor



Dra. Nuvia Orduño Cruz
Advisor



Dra. Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios
Advisor



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROTECNOLÓGICAS

Los que suscriben, miembros del Cuerpo Académico **UACH-CA-17 HORTOFRUTICULTURA** han fungido como parte integral en la asesoría de **ARELY JUDITH VASQUEZ MADRID** durante el desarrollo y conclusión del trabajo de Investigación: "**PERIODO LIBRE DE HELADAS PARA EL OESTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA**"

Dr. Oscar Cruz Álvarez
Integrante

Dr. Juan Luis Jacobo Cuéllar
Colaborador

Dra. Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios
Integrante



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROTECNOLÓGICAS

Los que suscriben, miembro del Cuerpo Académico **UACH-CA-11 FRUTALES DE ZONA TEMPLADA** ha fungido como parte integral en la asesoría de **ARELY JUDITH VASQUEZ MADRID** durante el desarrollo y conclusión del trabajo de Investigación: **“PERIODO LIBRE DE HELADAS PARA EL OESTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA”**

Dra. Nuvia Orduño Cruz
Integrante

Universidad Autónoma de Chihuahua
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, C. Presa de la Amistad 2015,
Cd. Cuauhtémoc, Chih.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, gracias a Dios por permitir seguirme preparando profesionalmente en mi vida y por poner en este camino de mi maestría a personas que fueron clave para que yo terminara este proyecto con éxito.

Gracias a todos los profesores que conformaron mi comité de tesis, así como a los maestros que me impartieron clases. En especial quiero agradecer al Dr. Oscar Cruz y al Dr. Jacobo Cuellar por darme las herramientas necesarias para desarrollar mi proyecto de tesis, gracias por darme las bases y poderme permitir empaparme poquito del mundo de la agricultura. Sé que uno de los dos años de mi maestría no fue sencillo por la modalidad virtual, pero agradezco infinitamente su esfuerzo por siempre atenderme en las dudas que me surgían y por tener la paciencia y la dedicación de transmitirme sus conocimientos. De igual manera agradezco a mi co-director de tesis de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez el M.C Mario Uc por apoyarme en cada paso de este proyecto referente a los sistemas de información geográfica, fue de gran utilidad para mí contar con un profesor que se especializara en mi licenciatura.

Agradezco también a mis compañeras de maestría, pero además de mi compañera a la que se convirtió en una de mis mejores amigas. Diana gracias por compartir los momentos en que queríamos renunciar a todo, pero siempre nos animábamos mutuamente para seguir y echarle más ganas que antes. Sin tí este camino no hubiera sido igual; agradezco infinitamente porque nuestra amistad es una de las mejores cosas que me queda de todo esto.

También quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Chihuahua y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Gracias por abrirme las puertas de esta gran casa de estudio y a CONACYT gracias por darme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación. Pondré todo de mi parte para que esta investigación sea de utilidad a nuestro país.

Por último, quiero agradecer a las dos personas más importantes de mi vida que estuvieron siempre cerca, en el transcurso de este proyecto. A Manuel, mi esposo y mi bebé, Hassan. Gracias por entender que en ocasiones no tenía el tiempo suficiente para Ustedes, sobre todo gracias a tí, Manuel, por cuidar a nuestro bebé cuando yo estaba demasiado ocupada en esta investigación. Gracias por dedicarle el tiempo que yo en ese momento no se lo podía dar, gracias por apoyarme y siempre darme ánimo por superarme profesionalmente. Te lo agradezco infinitamente.

Gracias a mi madre, Verónica porque a pesar de que no tenía el tiempo suficiente podía cuidarme a Hassan para que asistiera a mis clases. Muchas gracias por estar siempre que lo necesito que cada paso que doy en mi vida.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a toda mi familia, padres; Adolfo y Verónica, hermanos; en especial a Cristian, Diana y abuelos; Socorro y Chabelo. Gracias por haberme dado los valores y convertirme en la persona que soy en la actualidad. Muchos de mis logros se los debo a Ustedes.

Y de manera especial a Manuel y a Hassan, ya que fueron las principales personas por las que me propongo todas mis metas y deseos de superación. Espero que Dios nos permita seguir forjando esta familia y creciendo en todos los aspectos de nuestra vida. Los amo con todo mi corazón.

RESUMEN

El siguiente trabajo se realizó para la región centro-oeste del estado de Chihuahua con el objetivo de conocer la probabilidad de heladas tempranas, tardías, período libre de heladas y su relación con los cultivos mas importantes de la región. se analizaron datos de 12 estaciones meteorológicas en un período de 2000-2018 y mediante el valor del estadístico de Z estandarizado se estimó la probabilidad de helada, tomando en cuenta un valor de umbral de -2°C para heladas tardías y 0°C para tempranas. Los datos obtenidos se cartografiaron mediante el interpolador de ponderación de distancia inversa (IDW). Los resultados indican que el período de heladas comienza en octubre y termina en la última semana de abril. En cuanto a su distribución espacial y su efecto en los cultivos, las semanas más riesgosas para afectar a las principales variedades de manzana como Golden y Red se encuentran entre la última semana de marzo y la primera de abril (probabilidad de 60-70%), afectando a toda el área de estudio. Mientras que, en tempranas, el cultivo más vulnerable es el frijol cuando su cosecha se retarda hasta el mes de octubre. En período libre de heladas, Casa Blanca, Guerrero es la estación que presenta mayor número de días sin heladas (162 días) y zonas doradas, Cuauhtémoc más días con helada (190 días). Se asocio la probabilidad de heladas tardías con sitios geográficos para período de floración en frutales caducifolios y tempranas para el período de madurez fisiológica de cultivos anuales.

ABSTRACT

The following work was carried out for the central-western region of the state of Chihuahua with the objective of knowing the probability of early and late frosts, frost-free period and its relationship with the most important crops in the region. Data from 12 meteorological stations were analyzed in a period of 2000-2018 and by means of the value of the standardized Z statistic, the probability of frost was estimated, taking into account a threshold value of -2°C for late frosts and 0°C for early. The data obtained were mapped using the inverse distance weighting (IDW) interpolator. The results indicate that the frost period begins in October and ends in the last week of April. Regarding its spatial distribution and its effect on crops, the riskiest weeks to affect the main apple varieties such as Golden and Red are between the last week of March and the first week of April (60-70% probability), affecting the entire study area. While, in the early days, the most vulnerable crop is beans when their harvest is delayed until October. In the frost-free period, Casa Blanca, Guerrero is the station with the shortest frost-free period (162 days) and Zonas dorada, Cuauhtémoc the longest (190 days). The probability of late frosts is associated with geographic locations for the flowering period in deciduous fruit trees and early for the physiological maturity period of annual crops.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA.....	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
I INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 El clima y la agricultura.....	2
2.2 Bases de datos climatológicas y su importancia.....	2
2.3 Estaciones meteorológicas en México.....	4
2.4 Los SIG en la agricultura.....	4
2.5 Indicadores climáticos y los SIG	4
2.6 Heladas e información geoespacial.....	5
2.7 Caracterización de las heladas	6
2.8 Interpolación geoespacial	7
2.9 Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	8
2.10 Las heladas y su relación con los principales cultivos de la región	8
2.10.1 Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	8
2.10.2 Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	9
2.10.3 Manzano (<i>Malus x sylvestris</i> (L.) var. <i>domestica</i> (Borkh) Mansf).....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1 Área de estudio.....	11
3.2 Base de datos climática.....	12
3.2 Cálculo de indicadores climáticos.....	13
3.2.1 Probabilidad de heladas a -2°C (heladas tardías)	13

3.2.2 Probabilidad de heladas a 0°C (heladas tempranas):.....	15
3.2.3 Validación de los mapas	15
3.2.5 Período libre de heladas	17
3.3 Ubicación y validación de información meteorológica.....	17
3.4 Interpolación de temperaturas.....	20
3.4.1 Validación de las interpolaciones.....	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1 Probabilidad de heladas.....	24
4.2 Mosaico agrícola del área de estudio	27
4.4 Validación de cartografías.....	40
4.5 Período libre de heladas.	42
4.5 Ubicación de sensores de temperatura (dataloguer)	43
4.6 Generación y validación de cartografías de temperaturas horarias.....	45
V. CONCLUSIONES	46
VI.LITERATURA CITADA.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrones de adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia en la que se toma como referencia a Martori & Hoberg 2008.....	7
Figura 2. Localización geográfica del área de estudio y estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia con base a datos de UNIFRUT	12
Figura 3. Ejemplo del editor de código en el que se generaron las predicciones..	22
Figura 4. PH: probabilidad de helada. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada en las estaciones del área de estudio, período 2000-2019. A) Bachíniva, B) Casa Blanca, Gro, C) Álvaro Obregón, D) El Rosario, E) Mesa Miñaca, F) El Terrero, G) Quintas Lupitas, H) San José de la Herradura, I) Zonas Dorada, J) El Molino Namiquipa	26
Figura 6. Distribución de pendientes en el área de estudio.....	29

Figura 7. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el 28 febrero.....	30
Figura 8. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el mes de marzo. a) 10 de marzo, b) 15 de marzo, c)20 de marzo y d)25 de marzo.....	31
Figura 9. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el mes de abril. a) 8 de abril, b) 16 de abril, c)23 de abril y d) 31 de abril.	32
Los resultados muestran que las áreas con mayor riesgo son las que se encuentran a mayor altura (figura 6), sin embargo, también se puede observar que en áreas donde se localizan cultivos existe una probabilidad de heladas considerada.	
Figura 10. Probabilidad de ocurrencia de heladas tempranas para el mes de octubre. a) 10 de octubre, b) 20 de octubre y c)31 de octubre.....	37
Figura 11. Probabilidad de ocurrencia de helada temprana para el mes de noviembre. a) 8 de noviembre, b) 15 de noviembre y c)23 de noviembre.....	39
Figura 12. Probabilidad de ocurrencia de helada temprana para el 10 de diciembre	40
Figura 13. Validación cruzada del modelo de interpolación IDW. a) 8 de abril, b) 16 de abril y c) 23 de abril.	41
Figura 14. Área idónea/No idónea para la ubicación de estaciones meteorológicas. Fuente: Elaboración propia	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Puntos de referencia en los que se ubicaron las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio de probabilidad de heladas.....	13
Cuadro 2. Criterios de evaluación cualitativa de la bondad de ajuste. Fuente: Ritter et al. (2004).	16
Cuadro 3. Características y clasificación de las variables topográficas	17
Cuadro 4. Valores de pendiente (m) en la ecuación de la recta para corrección en base al gradiente vertical térmico (gvt).....	23

Cuadro 5. Coeficiente error medio cuadrático (RMSE), bondad de ajuste y ceff (coeficiente de bondad de ajuste)	42
Cuadro 6. Número de días libres de heladas (DLH) con 5, 25, 50, 75 y 95 % de . 43 probabilidad.....	43
Cuadro 7. Ubicaciones geográficas de las nuevas estaciones.....	44
Cuadro 8. Valores del error medio cuadrático (RMSE) en centígrados para el primero de agosto	45

I INTRODUCCIÓN

La temperatura es uno de los componentes climáticos más importantes a considerar en la agricultura, por su efecto en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Challinor et al., 2014). Esta variable climática muestra variación interanual y afecta de manera significativa el rendimiento de los cultivos, provocando por consecuencia, reducción en la rentabilidad de los sistemas de producción agrícola y en los ingresos de los productores (Quiroga-Gómez & Iglesias, 2005). Además, se desconoce la vulnerabilidad de muchos cultivos a pequeños cambios en las variables climatológicas (Quiroga-Gómez & Iglesias, 2005).

Sin duda la actividad agrícola es fundamental para la alimentación (Izquierdo Hernandez et al., 2004). Sin embargo, para mantener una alta producción y calidad de alimentos, se debe considerar el cultivo, clima y manejo (Izquierdo Hernandez, et al., 2004). En el estado de Chihuahua la agricultura es una de las actividades económicas más importantes, cuenta con 37 mil hectáreas cultivadas, dentro de las que destacan algodón (*Gossypium herbaceum*), avena (*Avena sativa* L.), manzana (*Malus domestica*), nuez (*Carya illinoensis*) y chile (*Capsicum annuum* L.), los anteriores ocupan el primer lugar de producción nacional (SIAP 2019). Sin embargo, los cambios de clima y la vulnerabilidad de los cultivos están propiciando la diversificación con características de tolerancia a sequía y bajos requerimientos de frío. Esperbent (2017) menciona en su estudio que los daños y pérdidas del sector agrícola son ocasionados por inundaciones, sequías, heladas o tormentas tropicales. En la actualidad existen herramientas que permiten tomar medidas anticipadas para mitigar los daños que pueden causar los desastres naturales en la actividad agrícola. Una base de datos climática completa y confiable y los sistemas de información geográfica (SIG), son una herramienta que tiene aplicación en la investigación y el trabajo profesional en las Ciencias de la Tierra y Ambientales (Bosque Sendra 2000). Con la construcción de modelos de interpolación de temperaturas, hidrológicos, pendientes, radiación, evapotranspiración, entre otros, y que, sumados al conocimiento agrícola de cada cultivo, se pueden generar alternativas para fortalecer la toma de decisiones en el manejo del cultivo. Los

sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas que se han empleado con mayor frecuencia en el ámbito de la agricultura, aplicándose para cuantificar la variabilidad espacial y temporal, logrando así el mejor manejo y rendimiento de los cultivos (Uva & Campanella, 2009). Por esta razón, una base de datos climatológica y la generación de indicadores climáticos posibilitan el mejor aprovechamiento de los recursos naturales (Cardoso 2011). En este sentido, el objetivo de este trabajo fué integrar una base de información climática con sistemas de información geográfica para obtener indicadores climáticos que puedan aplicarse en los sistemas de producción agrícola en el oeste del estado de Chihuahua.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El clima y la agricultura

La agrometeorología es la ciencia encargada de relacionar eventos climáticos con la agricultura, para lograr productos de mejor calidad (FAO, 2010). Además, la producción agrícola sigue dependiendo fuertemente de las condiciones del clima, incluso en algunos casos hasta el 80 % de la producción agrícola se debe a la variabilidad climatológica (López & Yader, 2018). La variabilidad del clima provoca efectos en la calidad y en la producción de los productos hortofrutícolas, por esta razón en las últimas dos décadas se han analizado y medido con mayor intensidad los efectos causados por el cambio climático en la agricultura (Magaña, 2013).

En la mayoría de los casos estos efectos son producidos por las principales variables agrometeorológicas (temperatura, precipitación, radiación solar). Otros factores climáticos que pueden influir en la producción son la temperatura del suelo, el viento y la humedad relativa, o la temperatura del punto de rocío. Por estas razones las investigaciones se han enfocado directamente con las consecuencias del clima sobre la producción de cultivos y más recientemente analizando las interacciones entre regiones y diferentes cultivos (Ordaz et al., 2010).

2.2 Bases de datos climatológicas y su importancia

En la última década del siglo XX se ha obtenido una mayor eficacia en la recopilación de los datos climáticos, ya que se cuenta con mayor número de

estaciones meteorológicas y computadoras portátiles utilizadas en las estaciones para introducir observaciones, además de que la aparición del internet trajo consigo el intercambio de información entre los usuarios (García 2016). Se han realizado investigaciones en donde la información meteorológica fué parte fundamental para orientar la toma de decisiones de los procesos de producción (Medina García et al., 2008). Además, es importante considerar que la intensidad los fenómenos meteorológicos ocurren cada vez con mayor frecuencia por el cambio climático, así que es primordial la anticipación a estos y la estimación de los efectos que pueden causar en el rendimiento y calidad de los productos cosechados es fundamental (Powell & Reinhard, 2016). A partir de 1877 fue que la mayoría de los países, incluyendo México iniciaron con el registro de datos climáticos para el mejor aprovechamiento del territorio (Vázquez-Gálvez 2012). El último informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en 2019 muestra que los fenómenos meteorológicos extremos reducen la producción de productos hortofrutícolas. Varios estudios analizan los efectos del clima en la agricultura y utilizan métodos en los cuales los objetivos son comparar los rendimientos de los cultivos con la variación anual del clima en un lugar determinado (Powell & Reinhard 2016). Otros estudios asocian las actividades agrícolas con los efectos que puede causar el cambio climático y varios investigadores se han dedicado a generar mapas con información de los posibles escenarios futuros; por ejemplo Challinor et al. (2014) en su estudio sobre un meta-análisis del rendimiento de los cultivos bajo el cambio climático y su adaptación, concluyeron qué es probable que aumente la variabilidad interanual de los rendimientos medios serán negativos a partir de 2030. También se ha encontrado que puede incrementar la intensidad y frecuencia en eventos de precipitación extrema con el paso del tiempo, sobre todo en los meses de invierno (Sugiyama et al., 2014). Existen múltiples factores climáticos que influyen en la producción de cultivos. Al respecto, Sakamoto et al. (2006) en el Delta del Mekong de Vietnam para el cultivo del arroz, señalaron que el número de ciclos de cultivo por año es afectado por las variaciones en el tiempo, las inundaciones y por presencia de sales en la estación seca (Koide et al., 2013).

2.3 Estaciones meteorológicas en México

En México el incremento en el número de estaciones se encuentra asociado con las demandas tecnológicas de los agricultores o gobiernos estatales. Desde febrero del 2008 existen 667 estaciones en todo el país, distribuidas en veintiocho redes estatales (INIFAP, 2008). En el estado de Chihuahua la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (UNIFRUT) y Fundación Produce, son las organizaciones que cuentan con una red de estaciones meteorológicas. Hoy en día en el estado, existen estudios en los que se emplea la información de las estaciones, para el cálculo de unidades frío, unidades calor, probabilidad de helada, evapotranspiración y frecuencia de riegos, que son estudios primordiales para que los agricultores se beneficien por los efectos del clima o se preparen para mitigar o prevenir los daños que puede causar el clima en la agricultura (Vilatte & Ruiz-Nogueira, 2008).

2.4 Los SIG en la agricultura

Los SIG (sistemas de información geográfica) son herramientas que hoy en día ha tomado cada vez mayor relevancia en el ámbito de la agricultura y se aplican para cuantificar la variabilidad espacial y temporal, logrando ser eficientes los sistemas de producción hortofrutícola (Uva & Campanella 2009). Una referencia lo constituye la agricultura de precisión, donde los SIG aportan funciones de análisis que facilitan y hacen más eficientes las aplicaciones de técnicas y productos para optimizar el tratamiento de cada sector del campo (Uva & Campanella, 2008).

Las nuevas tecnologías permiten generar estrategias para optimizar la producción de un cultivo, al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental y reconocer la variabilidad espacial inherente que está asociada a cada plantación o lote destinado a la producción agrícola. Esto una vez que se reconoce, localiza, cuantifica y registra la variabilidad espacial y temporal de cada unidad agrícola, es posible proporcionar un manejo agronómico diferenciado (Lizarazo-Salcedo & Carvajal, 2011).

2.5 Indicadores climáticos y los SIG

Los indicadores climáticos permiten contar con fuentes de información que describen el estado del ambiente, permitiendo generar información cuantificable,

con la cual es posible describir los cambios o fenómenos que suceden en el mismo (Rodríguez-Gamiño et al., 2013). La estimación de indicadores climáticos confiables requiere de información de calidad (Leal-Nares et al., 2010).

En la actualidad con la conjunción de métodos estadísticos, SIG y la información de estaciones meteorológicas, es posible generar información climática para áreas donde no existe (Hartkamp et al., 1999).

Entre los indicadores más importantes en la actividad agrícola se destacan los índices de: temperatura crítica máxima, temperatura crítica mínima, temperatura base para la acumulación de frío invernal, número de días con temperaturas superiores a, período libre de temperaturas menores o iguales a, temperaturas óptimas de desarrollo, velocidad de viento, fotoperiodo, radiación solar, mismo que se integran a modelos como: modelos de acumulación de unidades calor, modelos de acumulación de frío, evapotranspiración, modelos fenológicos de cultivos, plagas, enfermedades y maleza, entre otros (Kravchenko, 2003).

2.6 Heladas e información geoespacial

Uno de los principales fenómenos climáticos que causan severos daños, son las heladas o el granizo, donde la helada se puede definir como la disminución de la temperatura del aire a un valor igual o inferior al punto de congelación del agua 0°C (World Meteorological Organization, 1992). A pesar de que se trata de un fenómeno que responde a alguna estación en particular y una distribución espacial limitada, los daños causados son altamente destructivos sobre las cosechas de primavera o verano (Romá 2006). El daño provocado por una helada se encuentra en función de su intensidad, sensibilidad del cultivo, y de las condiciones locales, sin embargo, es complejo presentar una evaluación geográfica del daño (Bagdonas et al., 1978). Es por ello, que la mayoría de los agricultores pueden tener una idea sobre la ubicación de zonas frías en su localidad, pero es definitivamente necesario contar con información espacial del riesgo del daño de heladas (FAO, 2010).

Entre los métodos preventivos que los agricultores pueden tomar en cuenta para una helada son: registro de la temperatura del aire y la planta, elección de variedades resistentes al frío, retraso de la época de floración, poda alta y poda

tardía, orientación en la línea de plantación, cubiertas artificiales, seguro de pérdidas por heladas, entre otros. Sin embargo, el primer método de prevención que debe tener en cuenta el agricultor es el registro, análisis y seguimiento de los procesos del evento de helada (Morales, 2016).

Investigaciones recientes han logrado evaluar con éxito el riesgo de la helada en la agricultura, mediante el uso de información geoespacial, de datos de temperatura, radiación, pendiente, entre otros. Además de las características climáticas del cultivo. Esto le permite al agricultor tener caracterizado el problema físico y decidir; ¿Qué?, ¿Cuándo? y ¿Dónde? plantar (Snyder et al., 2010). Para esto se elabora una cartografía en mapa que permite mostrar la ocurrencia de una helada en determinada región. Esto es una primera aproximación que puede representar una herramienta útil para los agricultores o aseguradoras (Rojas et al., 2010).

2.7 Caracterización de las heladas

Con los recientes avances tecnológicos es posible contar con información geoespacial que permita una caracterización de las heladas (Bahia-Wutke et al., 2000). Las cartografías, por ejemplo, son de gran utilidad para interpretar las áreas vulnerables a las heladas. Un mapa temático es un ejemplo de cartografía, este tipo de mapas se utilizan principalmente para mostrar el desplazamiento de fenómenos naturales, y en la gestión de riesgos para señalar los posibles efectos de cambios climático, como son heladas, sequías, inundaciones, entre otros (Brewer, 2005).

Es a partir de datos meteorológicos históricos, períodos de retorno, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación (MDE), entre otra información geográfica, que es posible la caracterización de heladas. Entre los métodos más comunes para la generación de mapas temáticos, como probabilidad de heladas, se encuentran los métodos de interpolación del vecino más cercano, método SPLINES, ponderación de distancias inversas (IDW), Kriging, modificado de Shepard, entre otros (Vargas et al., 2011). A pesar de la existencia de estudios donde se realizan comparaciones entre los métodos de interpolación de temperatura en el área de estudio, no se han encontrado investigaciones relacionadas con la interpolación de probabilidades, y al ser una necesidad generar mapas de probabilidad de

heladas. Se tomaron en cuenta los criterios que mencionaba el método de ponderación de distancias inversas (IDW), ya que es el que mejor se ajusta a los datos de probabilidad de heladas (Rojas et al., 2010).

2.8 Interpolación geoespacial

La interpolación es un procedimiento matemático y geoestadístico el cual estima un valor de un atributo, a partir de otros valores (Díaz, 2015). La hipótesis básica indica que el promedio de valores de un atributo dentro de una vecindad en el espacio tiene una fuerte probabilidad de ser similar si son cercanos y que, esta probabilidad disminuye conforme hay una mayor distancia entre ellos (Miranda-Salas y Condal 2003).

Se pueden construir modelos de interpolación con un número pequeño de puntos de referencia (<10), pero a mayor número de datos (>30), los resultados pueden mejorar notoriamente (Díaz, 2015). Todo se encuentra en función del fenómeno interpolado y de la extensión espacial. La condición ideal al momento de realizar la interpolación es que el patrón ofrezca una cobertura total del área de estudio, sin embargo, es posible que patrones uniformes puedan inducir a falsos resultados (Rojas et al., 2010). Por esta razón los patrones que no ofrecen uniformidad en los datos son los más utilizados. La figura 1 muestra distintos patrones de adquisición de datos.

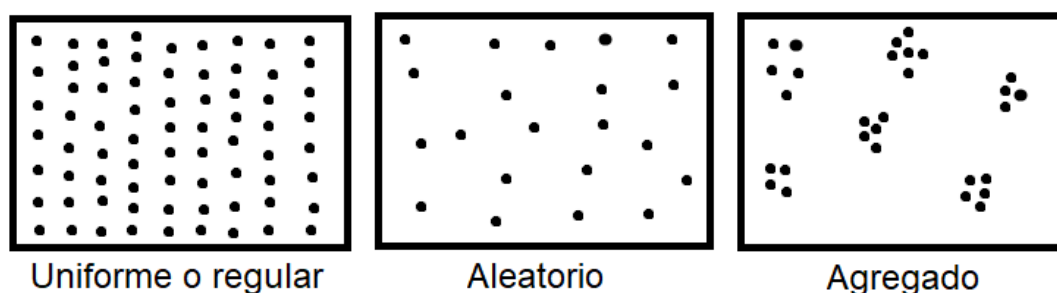


Figura 1. Patrones de adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia en la que se toma como referencia a Martori & Hoberg 2008.

2.9 Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Este método de interpolación (IDW por sus siglas en inglés) es un método local, exacto, y determinístico, donde la influencia y peso de los puntos más cercanos se expresa por el inverso de la distancia elevado a un exponente. Un exponente 1, 0, significa que la tasa de cambio es constante entre los puntos (interpolación lineal) mientras que un exponente de 2 o más sugiere que la tasa de cambio de los valores es mayor cerca de puntos conocidos (Chang, 2006). La expresión matemática del IDW (ESRI) se puede definir como:

$$IDW = \frac{\sum z(x)d^{-p}}{\sum d^{-p}}$$

donde IDW es el interpolador; d es la distancia de separación de un punto en el plano $Z(x)$; y p el exponente de ponderación.

p o exponente indica que tan rápido se generan valores diferentes (al aumentar su valor) conforme aumenta la distancia del sitio de interpolación. Es así, que un mayor valor de p , mayor es el peso se les da a los puntos más cercanos (Schleoeeder et al., 2001). Los valores de p están entre 1 y 3, donde 2 es el más común, de acuerdo a resultados de este mismo autor; entre mayor sea el valor de p , más exacto será IDW (Villatoro et al., 2008).

El método suele ser más preciso cuando las distancias entre los puntos son separadas, debido a que no es posible analizar el comportamiento espacial de la variable sobre un área, es decir el variograma no es posible de obtener porque no se reflejará la distancia máxima y la forma en que un punto es influenciado por otro ya que la distancia entre los puntos de muestreo es muy grande (Villatoro et al., 2008).

2.10 Las heladas y su relación con los principales cultivos de la región

2.10.1 Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

En México el frijol se cultiva principalmente en los estados de Zacatecas, Sinaloa, Durango y Chihuahua (INEGI, 2019). De acuerdo con el Atlas agroalimentario (2019), Chihuahua aporta un volumen de producción de 87,166 toneladas, siendo el ciclo de primavera cuando se obtiene un mayor volumen de producción. Los

municipios que se destacan por la producción de frijol en condiciones de temporal son Namiquipa, Cuauhtémoc, Riva Palacios, Guerrero, Cusihuiriachi y General Trías, donde la principal variedad sembrada es “Pinto saltillo”.

El cultivo requiere de temperaturas entre 11 y 20°C, suelos con texturas franco-arcillosos y franco-arenosos con pH de 5.3-7.5 (SIAP, 2019). Sin embargo, en todo el mundo el clima está experimentando cambios que cada vez son frecuentes y que afectan severamente la producción de los cultivos, en el estado de Chihuahua no es la excepción. Los principales factores de pérdidas de producción son sequías, plagas, granizo y heladas (Ocampo, 2011).

En México, Bahia-Wutke et al. (2000) y Barrios-Gómez & López-Castañeda (2009) reportan que una temperatura entre 4 a 10 °C dependiendo de las variedades y etapa fonológica del cultivo no causan daño en los folíolos. Sin embargo, estos autores también mencionan que en el área de estudio donde realizaron el experimento las bajas temperaturas ocurrieron en un lapso corto de tiempo. En la región de estudio ocurre lo contrario, durante el período otoño-invierno se presentan temperaturas similares o menores a los 0 °C por períodos medios-largos de tiempo, principalmente durante la noche, lo que puede provocar una reducción significativa en el desarrollo vegetativo rendimiento del cultivo (Salcedo, 2009).

El frijol de temporal en Chihuahua se siembra entre el 25 de mayo y el 25 de julio. Por otro lado, el de riego entre el 10 y el 20 de junio, dependiendo la variedad y la región, en el área de estudio el cultivo de frijol puede ser propenso a heladas días antes de su cosecha, lo que podría causar un daño irremediable en su rendimiento, ya que es un cultivo que no tolera heladas (Jacobo, 2015). La mayoría de las variedades de frijol requieren un período de cultivo libre de heladas entre 80 y 120 días y al ser considerado un cultivo de clima cálido y sensible a las temperaturas bajas, los productores deciden la fecha de siembra después de la última helada tardía de la temporada (Salcedo 2009).

2.10.2 Maíz (*Zea mays* L.)

El maíz forrajero representa uno de los cultivos de mayor rentabilidad en el estado de Chihuahua y ocupa el séptimo lugar de producción a nivel nacional con 783,154

t, mientras que en maíz en grano ocupa el sexto lugar en producción con 1,479,238 t (SIAP 2019). Este cultivo ha presentado una producción ascendente en los últimos 10 años, a excepción del 2011, donde se presentó una helada atípica y una prolongada sequía (Jurado-Arredondo et al., 2013). En el año 2020 presentó una sequía que afectó a la mayoría de los cultivos del estado. La producción de maíz de temporal ha mostrado amplia variación interanual, debido a la reducida precipitación, ocurrencia de heladas, así como otros factores que han incidido para disminuir la producción del maíz de temporal (Jurado-Arredondo et al., 2013)

Los principales factores climáticos que afectan a la producción de maíz en el estado, son las sequías y las heladas. En heladas, temperaturas de 0 °C en el período de floración provocan la esterilidad del polen y óvulo, lo que evita el desarrollo del grano (Chakrabarti et al., 2011). Dexter et al. (1994) indican que temperaturas de -2 °C durante la etapa del llenado de grano provoca la deshidratación (arrugamiento) de este y por consecuencia disminuye el rendimiento en la harina, lo que trae consecuencias negativas en el producto de la tortilla o el pan. Por otro lado, Labuschagne et al. (2009) reportan que temperaturas de -5 °C disminuyen el volumen de sedimentación del pan. El estudio de Gusta y O'connor (1987) mencionan que el efecto negativo de la helada en los cereales está en la germinación y el rendimiento.

INIFAP en (2015) en su paquete tecnológico menciona que el maíz de temporal tiene un período libre de heladas entre 118-124 días, heladas tardías terminan en junio y heladas tempranas inician entre el 13 de septiembre y el 22 de octubre.

2.10.3 Manzano (*Malus x sylvestris* (L.) var. *domestica* (Borkh) Mansf)

A nivel mundial, la superficie plantada de manzano asciende a 7,154,277 ha, donde se destacan la República Popular China, Estados Unidos, Turquía, Polonia, India y la República Islámica de Irán (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAOSTAT], 2019). En México, su cultivo abarca 60,328.83 ha, donde se destaca el estado de Chihuahua con el 52.75 % de la superficie plantada (SIAP, 2019). Entre las variedades predominantes se encuentran “Golden Delicious”, “Red

Delicious”, “Royal Gala” y en menor proporción por “Granny Smith”, “Fuji”, “Jazz, Cameo”, “Ambrosia” y “Honeycrisp” (Romero-Domínguez et al., 2017). El manzano se encuentra expuesto a factores bióticos y abióticos que afectan la calidad y la producción del fruto. En el estado de Chihuahua, la principal causa que está provocando daños en el cultivo es el cambio climático, repercutiendo en: reducida acumulación de frío invernal, variabilidad en la densidad de plagas y riesgo de enfermedades, reducción en la precipitación, sequías, heladas e incremento en los costos de producción (Ramírez-Legarreta et al., 2008).

Las heladas, pueden dañar la floración del cultivo, y por consecuencia afectar la polinización (Guerrero-Prieto et al., 2006). La fecha de inicio de floración depende de factores como: la acumulación de frío invernal, acumulación de calor, variedad, entre otros (Ramírez-Legarreta et al., 2008). Sin embargo, la dinámica de floración en manzano transcurre entre el 28 de febrero y 29 de abril, de acuerdo con la variedad y del manejo de los polinizadores (Guerrero-Prieto et al., 2006). Las heladas tardías que se presentan en los meses de marzo y abril provocan desfases en la etapa de floración, bajo cuajado de fruto, presencia de enfermedades como tizón de fuego y corazón mohoso, menor índice de flores y por consecuencia una menor producción del cultivo (Ramírez-Legarreta et al., 2006). El proceso de floración ocurre dentro de una serie de eventos fenológicos que suceden entre brotación y amarre del fruto y que se encuentran sobrepuestos entre ellos, por esta razón un buen manejo contra el daño de heladas tardías y una polinización adecuada son los principales factores que hay que tomar en cuenta para que el proceso brotación- amarre de fruto sea exitoso (Miranda & Royo, 2004).

III.MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El área de estudio comprende al centro oeste del estado de Chihuahua (Cuauhtémoc, Bachíniva, Namiquipa y Guerrero) (figura 2). El clima predominante es estepario cálido (Bsh) y estepario frío (Bsk) (García, 2004). Los principales cultivos son el maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L), cebada (*Hordeum*

vulgare), avena (*Avena sativa* L.), pastizal, manzana (*Malus domestica*), uva (*Vitis vinifera* L.), zarzamoras (*Rubus sp*), cerezas (*Prunus subg.Cerasus*) y durazno (*Prunus persica* L.) (INEGI, 2019).

3.2 Base de datos climática

Se obtuvo información de doce estaciones meteorológicas de la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (UNIFRUT). Como primer enfoque se utilizaron las variables de temperatura diarias de máximas y mínimas (cuadro 1). La información obtenida fue del período 2000-2018, y esta fue depurada y completada.

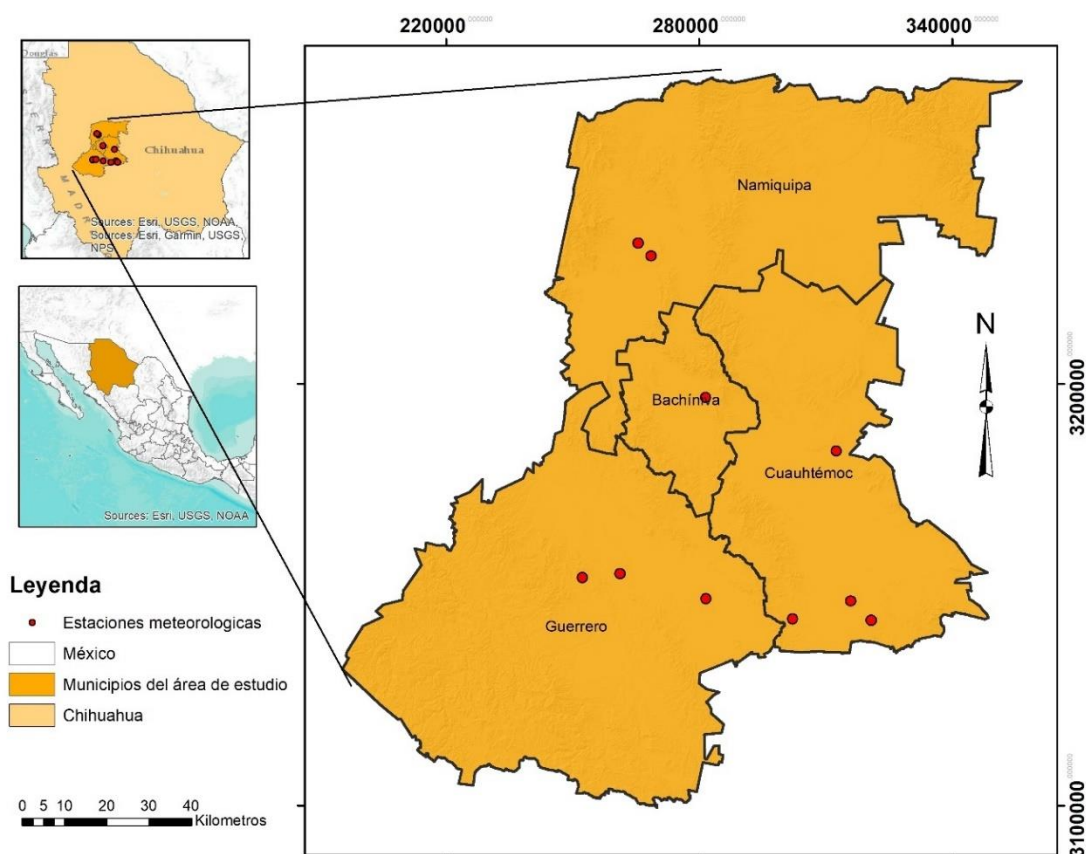


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio y estaciones meteorológicas.
Fuente: Elaboración propia con base a datos de UNIFRUT

Cuadro 1. Puntos de referencia en los que se ubicaron las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio de probabilidad de heladas.

Estaciones	X (latitud)	Y (longitud)	Altitud (msnm)
Las varas, Bachíniva	-107°14'24"	28°52'48"	2031
Casa Blanca, Guerrero	-107°31'48"	28°29'24"	2212
Álvaro Obregón, Cuauhtémoc	-106°55'12"	28°46'12"	2036
El Rosario, Guerrero	-107°13'48"	28°27'0"	2113
Mesa Miñaca, Guerrero	-107°26'24"	28°30'0"	2094
El Terrero, Namiquipa Alto	-107°22'48"	29°10'48"	1881
Quitas Lupitas, Cuauhtémoc	-106°52'48"	28°27'0"	2019
San José de la Herradura, Cuauhtémoc	-107°1'12"	28°24'36"	2220
Zona Dorada, Cuauhtémoc	-106°49'48"	28°24'36"	2060
El Molino, Namiquipa Bajo	-107°24'36"	29°12'0"	1852

3.2 Cálculo de indicadores climáticos

3.2.1 Probabilidad de heladas a -2°C (heladas tardías)

Para la realización de la cartografía de probabilidad de heladas se consideró un modelo probabilístico obtenido a partir de los registros de temperatura mínimas diarias observadas (Pereyra-Díaz et al., 2009). Estas últimas fueron obtenidas a partir de la base de datos durante el período de 2000-2018 (2).

Para la estimación de la probabilidad de heladas se consideraron temperaturas $\leq 2^{\circ}\text{C}$ registradas por las estaciones meteorológicas ubicadas en los puntos de referencia indicadas en el cuadro 1. Para cada estación y año, se consideró la fecha última de ocurrencia de temperaturas $\leq -2^{\circ}\text{C}$ (2000-2018) durante los meses de febrero, marzo y abril. Lo anterior se decidió con base en la temperatura que daña a la flor del manzano (Ovando et al., 2005).

Para el cálculo de la probabilidad de heladas se determinó el valor de Z estandarizada $Z = \frac{(X_i - \mu)}{\sigma}$; donde: Z= valor estandarizado; m= media y σ corresponde a la desviación estándar. En este proceso se revisaron las temperaturas mínimas diarias durante febrero, marzo y abril por estación y durante los años del 2000 al 2018, se registró el último día de ocurrencia de temperaturas menores o iguales a menos 2 °C. Se ordenaron de la fecha más temprana a la más tardía. Se asignaron rangos, se obtuvo el promedio, desviación estándar de los rangos y estimo el valor estandarizado (z). Una vez obtenido el valor estandarizado, se utilizó la tabla de valores de probabilidad acumulada (f) para la Distribución Normal Estándar propuesta por Moivre (1773) y con ello transformar el valor estandarizado a la probabilidad de Z. Por último, este valor se restó de uno, el resultado es la probabilidad de heladas para cada día calculado.

Se cartografiaron los resultados de probabilidad, utilizando un conjunto de datos vectoriales de los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Cuauhtémoc y Guerrero descargado del geoportal de CONABIO (2012) y las estaciones meteorológicas proporcionadas por UNIFRUT, se capturaron los datos de probabilidad diarios para los meses de febrero, marzo y abril.

Se interpolaron las probabilidades utilizando IDW que de acuerdo a Kravchenko (2003) y Villatoro et al. (2008) es recomendado para bases de datos pequeñas, donde los parámetros del variograma no son conocidos, también cuando la distancia de muestreo es muy grande.

Por último, los mapas fueron validados por el error medio cuadrático (Pereyra-Díaz et al., 2009). Los resultados son mapas en formato raster de probabilidad de heladas con una resolución espacial de 15 metros. Los mapas de probabilidad de heladas muestran una clasificación con valores de 0-1 (cero indicando baja probabilidad de heladas y 1 indicando una alta probabilidad de heladas). Los mapas son diarios en el período de febrero, marzo y abril.

3.2.2 Probabilidad de heladas a 0°C (heladas tempranas):

Se tomó en cuenta 0°C como el valor de temperatura que puede afectar al cultivo. Para esto se utilizaron los mismos datos, solo que en esta ocasión se tomaron en cuenta los meses de septiembre a los primeros 10 días de diciembre. Se registró la fecha del primer día de ocurrencia en cada año de una temperatura $\leq 0^\circ\text{C}$ para cada una de las estaciones, de igual manera que en heladas tardías los días fueron ordenados en cada estación empezando por la fecha más temprana en donde se registró la temperatura indicada (Pereyra-Díaz et al., 2009). Se obtuvieron los mismos estadísticos, solo que el valor de probabilidad de Z obtenido a partir del valor estandarizado fue la probabilidad de helada temprana para cada día calculado. El proceso para los mapas de probabilidad para heladas tempranas fue el mismo, método de IDW.

3.2.3 Validación de los mapas

Con el propósito de validar los mapas generados a partir de las interpolaciones por IDW, se obtuvo el error medio cuadrático (RMS, Root Mean Square Error), el cual es una medida de la diferencia entre los valores observados y estimados (Esteller et al., 2002). Las diferencias se elevan al cuadrado y se suman, tal como lo describen Ritter et al. (2011) con la siguiente expresión matemática:

$$\text{RMS} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{n}$$

donde, RMS: error medio cuadrático, P_i : Valor de probabilidad real, O_i : Valor de probabilidad estimada a partir del interpolador IDW, n: número total de estaciones o puntos de chequeo.

Así se puede calcular la medida del error en las mismas unidades que las observaciones reales. El RMS se calculó para cada día, tanto en las probabilidades de heladas tempranas como tardías. El error RMS es directamente comparable con el concepto de desviación estándar (Esteller et al., 2002). Además de los valores de RMS, también se calculó el indicador de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este indicador es ampliamente utilizado en la evaluación de modelos

hidrológicos, el cual se caracteriza por su flexibilidad para ser aplicado en distintos modelos matemáticos (McCuen et al., 2006). Para ellos se empleó la siguiente formula;

$$ceff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - P_i]^2}{\sum_{i=1}^N [O_i - O]^2}$$

Donde el *ceff* representa el complementario a la unidad de la relación entre el error medio cuadrático y la varianza de los valores observados. Un *Ceff* = 1 indica un ajuste perfecto, mientras que un *ceff* < 0 el promedio de los valores observados es mejor predictor que el propio modelo utilizado (Ritter, et al., 2010). El *ceff* puede resultar un indicador útil, pero es recomendable acompañar su cálculo con un análisis del sesgo en las predicciones del modelo y del posible efecto de los valores atípicos en las series de valores (McCuen et al., 2006).

La interpretación de los valores de *Ceff* se realizó de acuerdo con lo indicado por Ritter, et al. (2004). Para ellos los valores de RMSE inferiores a la mitad de la desviación estándar de los valores observados (SD) pueden considerarse bajos, con lo que podemos interpretar este criterio como que valores bajos son satisfactorios (≤ 0.5 SD). De acuerdo con Ritter et al. (2004) se deduce que:

$$Ceff = 1 - \left(\frac{RMSE}{SD} \right)^2$$

Entonces se deduce que valores de *Ceff* ≥ 0.75 son satisfactorios o aceptables (Ritter et al., 2010)

Cuadro 2. Criterios de evaluación cualitativa de la bondad de ajuste. Fuente: Ritter et al. (2004).

Evaluación	RMSE/SD *100	<i>Ceff</i>
Muy Buena	< 30%	≥ 0.91
Buena	30-40%	0.84-0.91
Aceptable	40-50%	0.75-0.84
No aceptable	>50%	<0.75

3.2.5 Período libre de heladas

Para determinar el período libre de heladas se realizó lo siguiente: 1) se identificaron las fechas de la primera ocurrencia de helada a una temperatura de 0 °C en un período de 2000-2018; 2) se identificaron las fechas de la última ocurrencia de heladas a una temperatura ≤ -2 °C para el período 2000-2018; 3) los períodos libres de heladas para cada estación se clasificaron de acuerdo con la probabilidad de helada, obteniendo así los períodos libres de helada con una probabilidad del 5%, 25%, 50% y 95 % (Pereyra Díaz, et al., 2009).

3.3 Ubicación y validación de información meteorológica

Con el propósito de validar la información obtenida se decidió ubicar 6 sensores de temperatura Extinch instruments® (FLIR Systems, USA) en diferentes puntos del área de estudio. La información obtenida se integró con la base de datos de estaciones climatológicas de UNIFRUT. Para la ubicación de sensores, el primer paso fue descargar de la página oficial de INEGI un modelo digital de elevaciones (MDE), con resolución espacial de 15 m.

Con el uso del software ArcGis 10.3, se obtuvieron variables topográficas (orientación de laderas, sombreado y pendiente) que resultaron a partir del procesamiento del modelo digital de elevaciones (MDE). El cuadro 3 muestra las características y la clasificación de cada una de las variables topográficas.

Cuadro 3. Características y clasificación de las variables topográficas

Variable topográfica	Características	Clasificación
Mapa de pendientes	Terreno con ángulos de inclinación de 0- 67.66°	• 1°-7.5° orden #1 • 7.5°-15.05° orden #2 • 15.05°-22.5° orden #3 • 22.5- 30.05° orden #4 • 30.05-37.55° orden #5 • 37.55-45.05° orden #6 • 45.05-52.55° orden #7 • 52.55-60.05° orden #8

		• 60.05-67.66° orden #9
Mapa de orientación de laderas	Valores de -1-360°	• -1 Zonas planas • 0-45° NNE • 45-90° ENE • 90-135° ESE • 135-180° SEE • 180-225° SSW • 225-270° WSM • 270-315° WNW • 315-360° NNW
Mapa de sombreado	Ángulo de sol 0-254°	• 1-84.66° Orden #1 • 84.66-169.32 orden #2 • 169.32-254° orden #3

En el proyecto de Norma mexicana de la Secretaría de Economía, titulado “estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas (2015)” se presentan los criterios para la correcta ubicación de termómetros para estaciones meteorológicas. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO No. 49) las estaciones principales no deberán superar una distancia de 150 km (Se exceptúan aquellos casos en que la diferencia de elevación entre dos estaciones es de 1000 msnm o menos, en cuyo caso no son aplicables los criterios de distancia horizontal mínima).

De acuerdo a las condiciones del entorno la secretaria de economía en el proyecto de norma mexicana (2015) recomienda las siguientes indicaciones:

1. El lugar en el cual está ubicada la estación meteorológica debe ser representativo del área desde el punto de vista meteorológico.
2. Debe evitarse un sitio que tenga obstrucciones en la vecindad próxima, que puedan afectar la medición de las variables.

3. El suelo donde se encuentre ubicada la estación debe estar cubierto de un pasto natural de la región que se mantendrá corto y sólo en condiciones extremas, se regará el lugar donde se va a medir la temperatura del suelo, y éste se debe conservar limpio de vegetación natural o inducida.
4. A fin de evitar afectaciones a la infraestructura y la exposición de los instrumentos meteorológicos de la estación debido a la erosión del suelo por escurrimiento repentino de agua o por marea de tormenta, el sitio donde se ha de instalar la estación no debe estar ubicado en terrenos con pendientes pronunciadas, en cauces de ríos aparentemente secos, ni a orillas de cauces dentro del área inundable, o donde el impacto de marea de tormenta sea susceptible de presentarse por lo menos una vez al año.
5. El lugar donde se ubicará la estación meteorológica deberá conservar las características del entorno natural de la región.
6. Debe ser terreno plano, horizontal, rodeado de espacios abiertos, con una pendiente inferior a 1:3 (1 vertical, 3 horizontal o ángulo de inclinación $\leq 19^\circ$). Pluviómetro rodeado de obstáculos de altura uniforme, dentro de un ángulo de elevación de entre 14° y 26°
7. La posición de referencia para los ángulos elevados, es el elemento sensible del instrumento. - No se proyecta ninguna sombra sobre el sensor cuando el sol está en un ángulo de más de 5° . - No hay obstáculos reflejantes que no proyectan sombras con un ángulo de altura superior a 5° y una anchura angular total de más de 10° .
8. La posición de referencia para los ángulos elevados es el elemento sensible del instrumento - No se proyecta ninguna sombra sobre el sensor cuando el sol está en un ángulo de más de 3°
9. No debe existir ningún tipo de obstrucción sobre el plano del sensor mayor a 5° de inclinación, particularmente dentro del azimut (ángulo en el horizonte en relación a un punto cardinal donde nace o se oculta una estrella).

De acuerdo con estas consideraciones los mapas de sombreado, orientación de laderas y pendientes se superpusieron. El resultado permite identificar con mayor facilidad y precisión geográfica las áreas que satisfacen los requisitos indicados.

Entre estos, pendientes $\leq 19^\circ$, sol mayor a un ángulo de 5° , evitar obstrucciones y debe ser un lugar representativo del área de estudio; para esto se eligieron puntos cercanos a sitios con actividad agrícola.

3.4 Interpolación de temperaturas

En esta sección se utilizó la base de datos de la red de estaciones meteorológicas de UNIFRUT y la información obtenida de los sensores de temperatura instalados en este trabajo. Para la elaboración de esta cartografía fué necesario realizar predicciones de las áreas que no cuentan con estaciones, por esta razón es necesario evaluar la predicción por diferentes métodos de interpolación y poder conocer el comportamiento de los datos climáticos en el área de estudio. Es importante señalar que en el estudio se instalaron termómetros en diferentes puntos, con el propósito de que la predicción realizada por alguno de los métodos de interpolación mejorara su precisión.

Para el análisis de los datos se eligieron cinco días de la red de estaciones meteorológicas de UNIFRUT que coincidieran con la información de los sensores de temperatura instalados, ya que éstos solo contaban con información de los meses de agosto y septiembre del año 2020.

Se optó por el método geoestadístico IDW, este método utiliza un algoritmo simple que se basa en distancias (Johnston et al., 2001). IDW calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia (Johnston , et al., 2001), como menciona la siguiente ecuación:

$$y_i = \frac{[d(S_i, S_o)]^{-p}}{\sum_{i=1}^n [(S_i, S_o)]^{-p}}$$

Donde P es el parámetro del exponente que controla la velocidad de los pesos de los puntos tienden a cero (al aumentar su valor) conforme se incrementa la distancia del sitio de interpolación. Entre mayor sea el valor de p, mayor peso es dado a los puntos más cercanos y por consiguiente se obtiene superficies más continuas o

suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra (Schloeder et al., 2001).

Al respecto Gotway et, al. (1996) mencionan que IDW es más preciso cuanto más alto sea el valor de p . Este método es rápido en cálculos, sin embargo, produce patrones poco reales alrededor de los puntos muestreados (Gotway et al., 1996). En este sentido Da Silva et, al. (2013) mencionan que el método de distancia ponderada inversa (IDW) fué más eficiente con respecto a Kriging Bayesiano, esto al interpolar datos de temperatura, en el que se empleó el error medio cuadrático para validar sus cartografías. A sí mismo, Machado et,al. (2007) al evaluar métodos geoestadísticos para interpolación de variables climáticas, el método IDW fue el interpolador con mayor precisión. En este trabajo los datos interpolados fueron horarios y se repitió el proceso 120 veces mediante la plataforma Google Earth Engine.

El editor de código Google Earth Engine (EE) es un IDE a través de la web para la API de JavaScript de Earth Engine. Sus funciones están diseñadas para hacer que el desarrollo de flujos de trabajos geoespaciales complejos sea rápido y fácil (Google 2020). En el editor de código se integró la interpolación por el método IDW, dentro de este se utilizaron los datos de temperatura horaria de los días 1,5,10,19 y 28 de agosto del año 2020, y con esta información corrieron y se generaron 120 predicciones de temperaturas horarias para el área de estudio. La figura 3 muestra un ejemplo del editor de código en el que se generaron las predicciones.

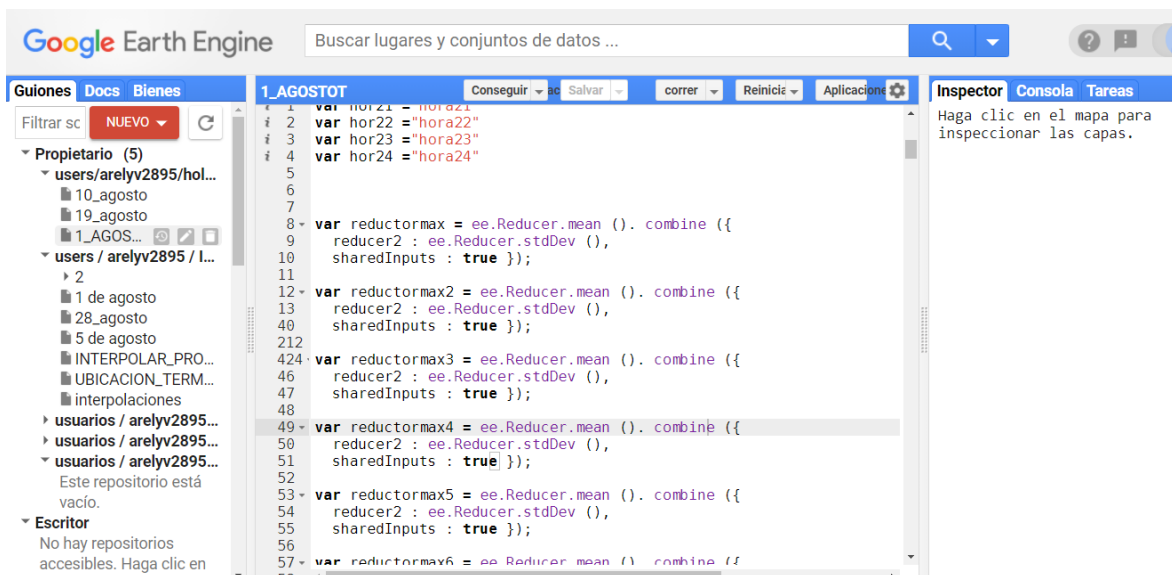


Figura 3. Ejemplo del editor de código en el que se generaron las predicciones.

En el mismo código se corrigieron las interpolaciones con base al gradiente vertical térmico (GVT), ya que las variaciones de la temperatura son causadas por diversos factores como exposición, altitud, cercanía o lejanía a masas de agua, entre otros (Comino, 2013).

En el caso de altitud desde (1981) Escorrou & Flohn confirmaron una variación de la temperatura de entre 3 y 5°C por cada 1000 m que se ascienda o descienda, lo cual concuerda con lo que menciona Ramos & Aguilar en su estudio (2004), quienes calculan el gradiente vertical térmico utilizando las alturas de estas. Por su parte Quevedo & Sánchez (2009) mencionan que a mayor altura es menor la temperatura y viceversa. Para realizar esta corrección se graficaron las temperaturas horarias como variables dependientes y las alturas de las estaciones como variables independientes mediante una regresión lineal simple ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$), de la cual se obtuvieron los valores de la pendiente (m) de la recta (Fries et al., 2009). Los valores de la pendiente (m) en la recta se pueden observar en el cuadro 4 para cada hora en los cinco días estudiados y el valor de Z (altitud) promedio de los valores de altura del MDE fue de 2154.8 msnm. Con estos valores se procedió a realizar la corrección por el GVT, aplicando una ecuación modificada propuesta por Fries et al. (2009), donde emplean humedad y altitud.

$$Temperatura = Tpred + ((r * Zdet - Zest))$$

Donde; Temperatura: temperatura determinada, Tpred: temperatura predicha de la estación, r: valor mx en la regresión lineal, Zdet: promedio de las alturas del MDE, Zest: altura de cada estación medida.

Cuadro 4. Valores de pendiente (m) en la ecuación de la recta para corrección en base al gradiente vertical térmico (gvt).

Hora	Agosto (días)				
	1	5	10	19	28
1:00 am	0.0024	-0.001	-0.0116	-0.005	-0.0047
2:00 am	0.0044	-0.0002	-0.0119	-0.0074	-0.0047
3:00 am	0.0039	0.0081	-0.0024	-0.0067	-0.002
4:00 am	-0.0035	0.011	0.0022	-0.0069	-0.0007
5:00 am	-0.0037	0.0153	0.0054	-0.0049	0.002
6:00 am	-0.0008	0.0178	0.008	-0.0046	0.0032
7:00 am	0.0004	0.0125	0.0097	-0.00009	0.008
8:00 am	-0.00005	0.0007	0.00333	0.007	0.0087
9:00 am	-0.0011	-0.0118	-0.0011	0.0041	0.0094
10:00 am	-0.0074	-0.0177	-0.0065	-0.0035	-0.0003
11:00 am	-0.0117	-0.0207	-0.0088	-0.0067	-0.0041
12:00 pm	-0.0144	-0.0188	-0.0112	-0.0071	-0.0051
13:00 pm	0.006	-0.0227	-0.0113	-0.0082	-0.0037
14:00 pm	-0.0043	-0.0197	-0.0103	-0.0069	-0.0076
15:00 pm	-0.0071	-0.0213	-0.0054	-0.009	-0.0091
16:00 pm	-0.0043	-0.0208	0.0043	-0.0091	-0.0114
17:00 pm	-0.0011	-0.0141	0.0074	-0.0105	-0.0145
18:00 pm	-0.0037	0.0123	0.0051	-0.0106	-0.0191
19:00 pm	-0.0007	-0.0084	0.0038	-0.0117	-0.0148
20:00 pm	-0.0055	-0.0097	-0.0009	-0.0128	-0.0128
21:00 pm	-0.0043	-0.0118	-0.0055	-0.0158	-0.0102
22:00 pm	-0.0017	-0.0114	-0.0062	-0.0124	-0.0133
23:00 pm	-0.0007	-0.0113	-0.0073	-0.0122	-0.0157
24:00 pm	0.0037	-0.0106	-0.0081	-0.0154	-0.0089

3.4.1 Validación de las interpolaciones

La validación de cada interpolación con base a IDW se realizó mediante el RMS (error medio cuadrático), cuyos valores óptimos son la desviación estándar y 1, respectivamente (Hengl, 2009; Saz et al., 2010), siguiendo la recomendación de

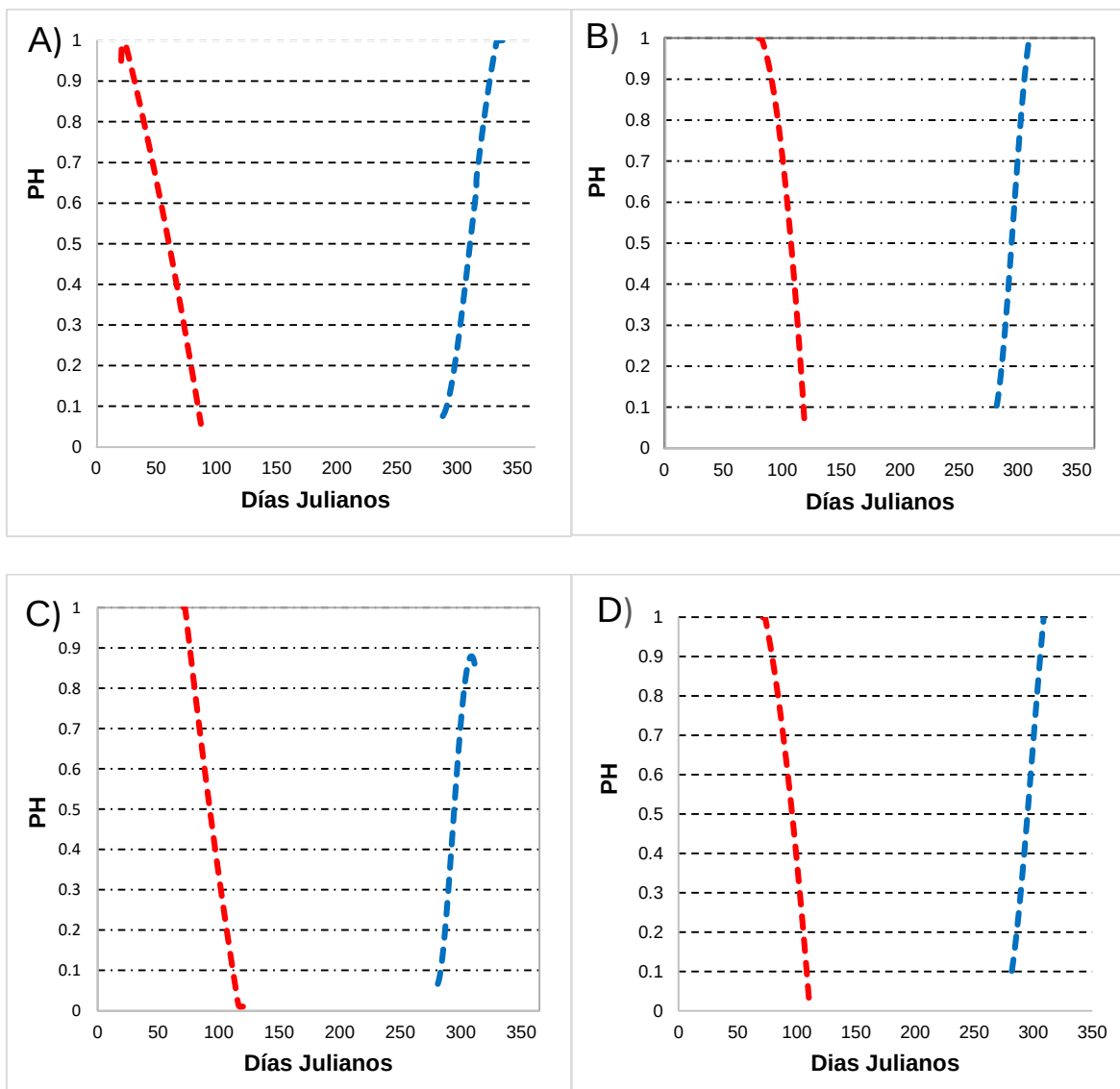
Alzate Velásquez et al. (2017). El error se cuantificó en términos de °C. Un valor de RMSE=0 indica un ajuste perfecto (Ritter et al., 2004). En la página 23 describe el método y la ecuación del RMSE.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Probabilidad de heladas

La agrometeorología define a la helada como la temperatura a la cual los tejidos de la planta comienzan a sufrir daños (González-Botero, 2018). En este sentido, con el uso de las nuevas tecnologías es posible predecir un evento de helada a partir de la medición de temperaturas mínimas de las estaciones meteorológicas cercanas. El modelo estadístico utilizado en este trabajo permitió calcular la ocurrencia de probabilidad de heladas tempranas y tardías en el período 2000-2018.

Se generaron las probabilidades de ocurrencia de heladas tempranas y tardías con base en los resultados obtenidos de la función de la distribución normal (figura 4). Los datos que se utilizaron para generar las gráficas y las cartografías son representativos, ya que la función de la distribución normal de z se ajustó en base a una ecuación polinómica. La línea azul indica la probabilidad de ocurrencia de heladas tempranas y la roja probabilidad de heladas tardías. Las figuras muestran la probabilidad de registrar una helada tardía que pueda afectar a algún cultivo de la región entre los días julianos 45 a 95 aproximadamente (segunda quincena de febrero a la segunda quincena de abril). En la primera quincena de febrero, existe una probabilidad entre el 90 al 100% de que ocurra una helada sobre los alrededores de las estaciones del municipio de Bachíniva y Quintas Lupitas. Por otro lado, en las estaciones de Casa Blanca, Álvaro Obregón, El rosario y el Molino la ocurrencia de helada entre 90 y 100 % tiende a postergarse hasta los días julianos entre 80-110 (segunda quincena de marzo y primera quincena de abril).



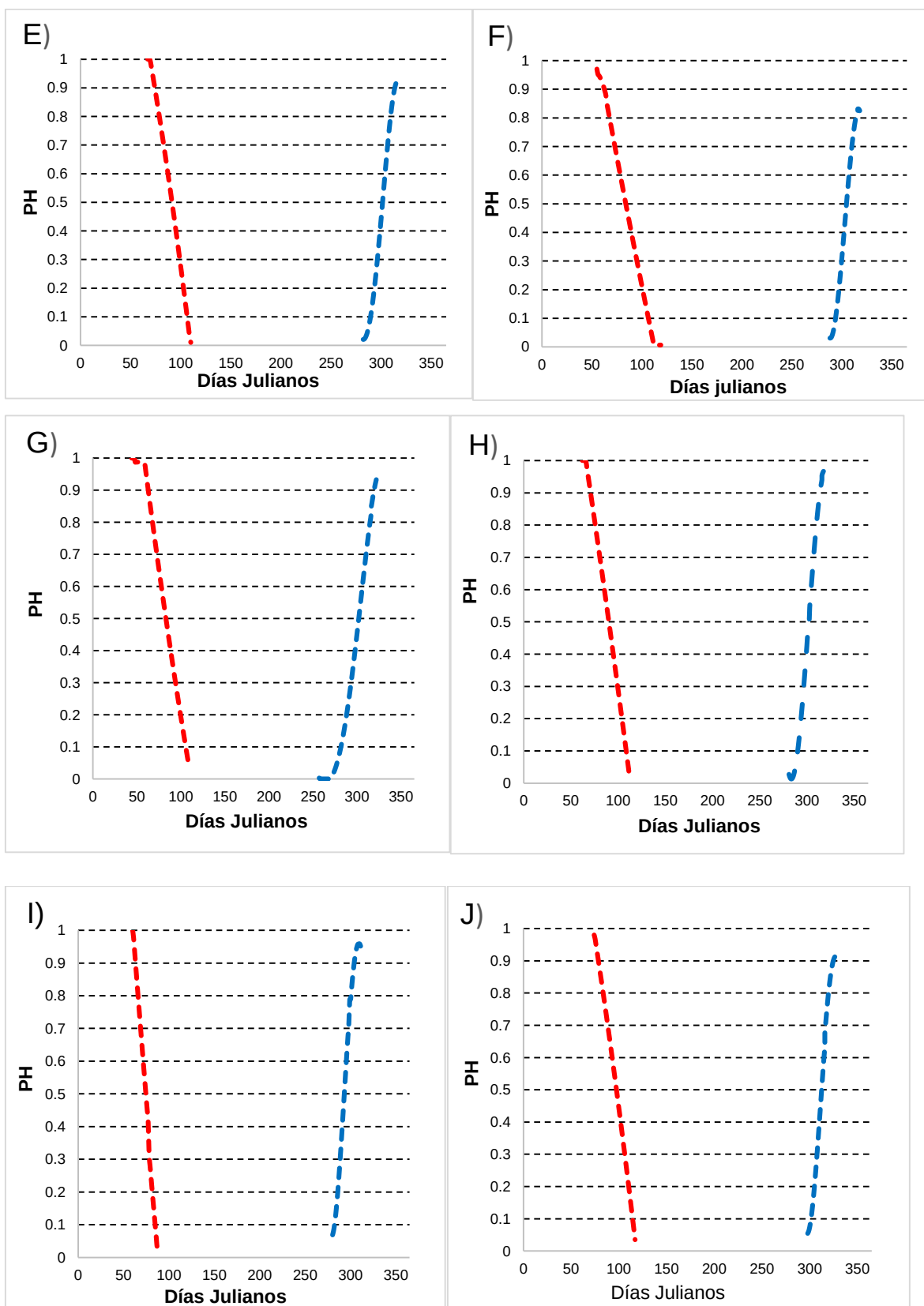


Figura 4. PH: probabilidad de helada. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada en las estaciones del área de estudio, período 2000-2019. A) Bachíniva, B) Casa Blanca, Gro, C) Álvaro Obregón, D) El Rosario, E) Mesa Miñaca, F) El Terrero, G) Quintas Lupitas, H) San José de la Herradura, I) Zonas Dorada, J) El Molino Namiquipa

4.2 Mosaico agrícola del área de estudio

Los cultivos que se presentan en la región centro-oeste del estado de Chihuahua es variada y amplia. Es imprescindible el estudio de umbrales de temperatura, y la ubicación de las diferentes plantaciones para cada zona. Si analizamos el mosaico de variedades de cultivos en la zona de estudio (figura 5), lo primero que llama la atención es la gran extensión de avena o maíz. De las 483 mil ha sembradas, 172 mil ha (35%) corresponden a avena forrajera, 127 mil ha (26%) a maíz en grano, 90 mil ha (18%) a frijol, 44 mil ha (9%) a maíz forrajero, 23 mil ha (4.8%) a avena en grano y 26 mil ha (5.3%) a manzana. Sin embargo, este último ocupa el segundo lugar en valor de producción, seguido del maíz en grano con un valor de 575 mil t de producción (Secretaría de Desarrollo Rural 2017-2021).

Al realizar un análisis agrícola del área de estudio se puede observar una caracterización más variable, que puede ser vital al momento de entender la relación de los rasgos climáticos de la zona. La región centro oeste del estado, que incluye a los municipios de Namiquipa, Bachíniva y Cuauhtémoc representan la mayor de producción de maíz en grano y manzana, con una superficie sembrada de 134 mil has y 20 mil respectivamente (Secretaría de Desarrollo Rural 2017-2021). Si bien estas parcelas se encuentran a una altitud no mayor a 10° (figura 6), la mayoría son parcelas que cuentan con un sistema de riego integrado. Mientras que en el municipio de Gurrero el cultivo de avena forrajera tiene mayor superficie sembrada (38 has), sin embargo la manzana representa el mayor volumen de producción en toneladas (129 mil t). Las parcelas se encuentran a una altitud no mayor a 10° y en el caso de la avena aún existen muchos agricultores que dependen de las precipitaciones para el éxito de su producción.

La presencia de heladas tardías en la zona de estudio afecta fuertemente al manzano, lo que ha provocado que algunos agricultores opten por cultivos alternos, tal es el caso de frutos rojos, que además de ser cultivos más sustentables como los frutos rojos, una helada no pueda afectar su floración ya que la mayoría florecen en el mes de mayo (Parra-Quezada et al., 2005). Este tipo de cultivos no son

identificados en el mapa de usos de suelos debido a su reciente incorporación y pocas hectáreas cultivadas.

Los cultivos alternos, así como nuevas variedades y portainjertos para el cultivo de la manzana son unas de las nuevas prácticas agrícolas que han puesto en marcha los agricultores de la región, logrando con éxito disminuir la vulnerabilidad y la exposición a las heladas.

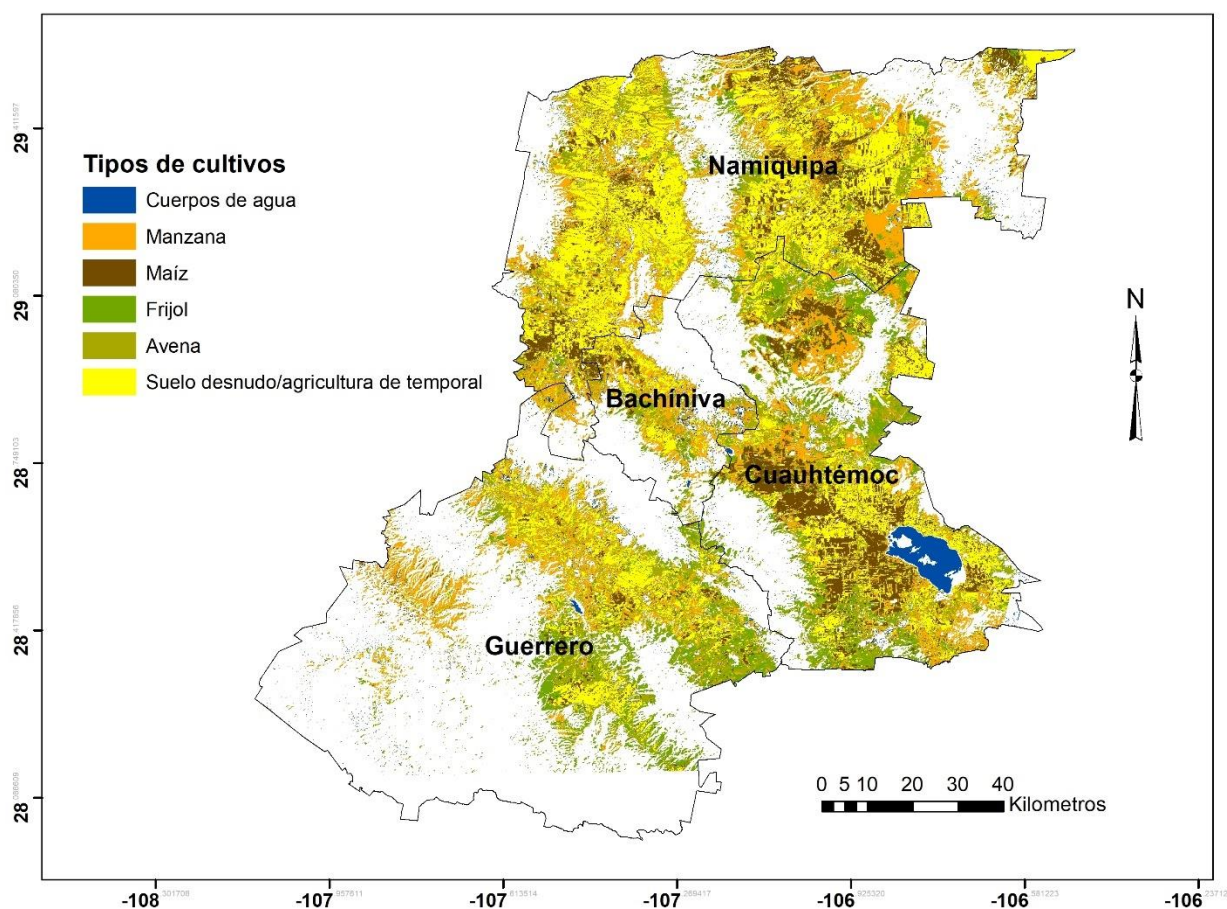


Figura 5. Distribución geográfica de los cultivos del área de estudio

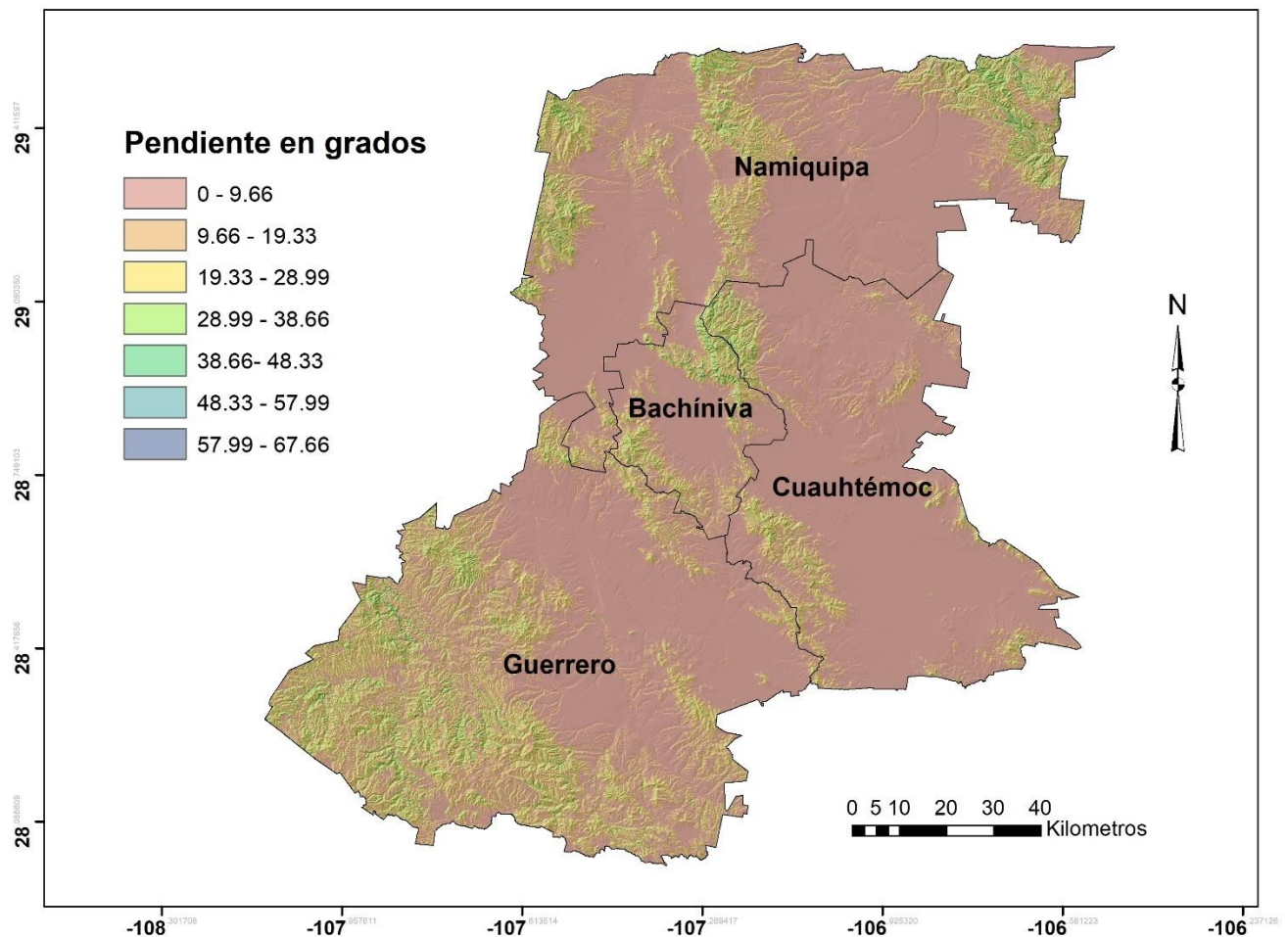


Figura 6. Distribución de pendientes en el área de estudio

4.3 Impacto de las heladas en los cultivos de la región

A partir del análisis de la cartografía de probabilidad de heladas en la zona de estudios, se pueden obtener datos interesantes acerca de áreas o cultivos que pueden ser afectadas por la incidencia de bajas temperaturas. Sin embargo, será preciso consultar o realizar estudios de la valoración agrícola de la zona de estudio.

Como se puede observar en la figura 7, a partir del 28 de febrero cuando la probabilidad de 1 (100 %) inicia el descenso.

Es para el 15 de marzo (figura 8) donde se aprecia un decremento en la probabilidad y así sucesivamente en el transcurso de los días. La figura 8 muestran los mapas

del de marzo, los días que aparecen en la imagen, son los días en donde se aprecia mayor diferencia en las probabilidades de heladas. En la primera quincena de marzo el municipio de Guerrero tiene una alta probabilidad de helada (90-100%), los demás municipios del área de estudio se encuentran en una probabilidad del 80-90% (figura 8).

Por otra parte, para el 25 de marzo que el área que ocupa la probabilidad de 80-90% comienza disminuir, de echo solo el municipio de Guerrero presenta una pequeña área de la probabilidad, mientras que, en los demás municipios, incluyendo Guerrero la probabilidad varía entre 60-80 % (figura 8). Los resultados muestran que, a partir de la primera quincena de abril en los municipios de Namiquipa, Cuauhtémoc y Bachíniva hay un descenso en la probabilidad (30-40 %), mientras que el área sobrante se presenta una probabilidad que oscila entre el 40-50% (figura 9).

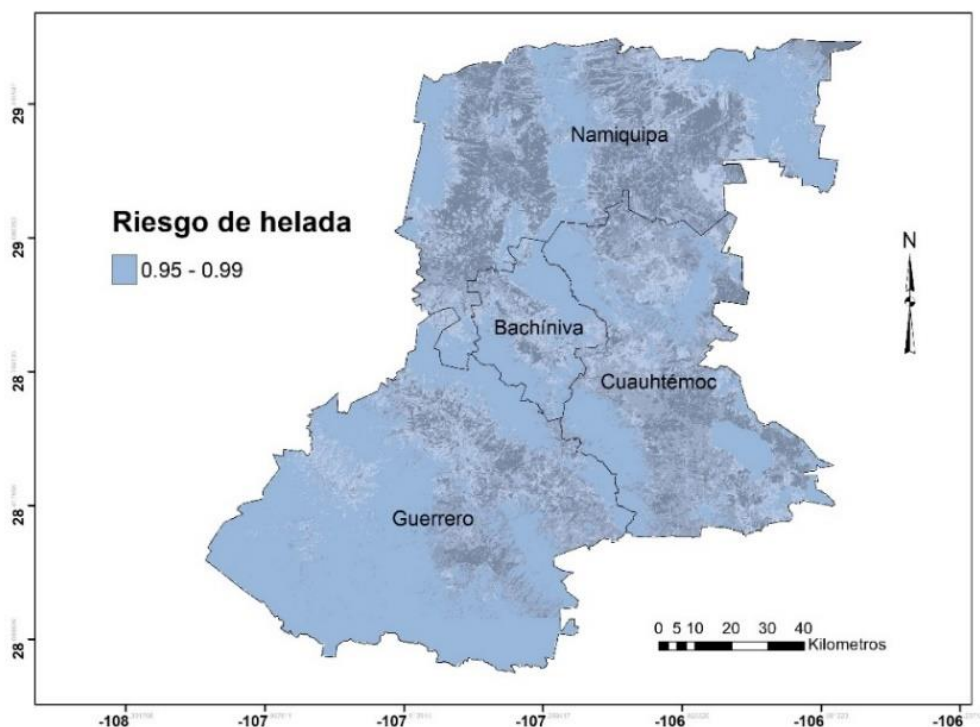


Figura 7. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el 28 febrero.

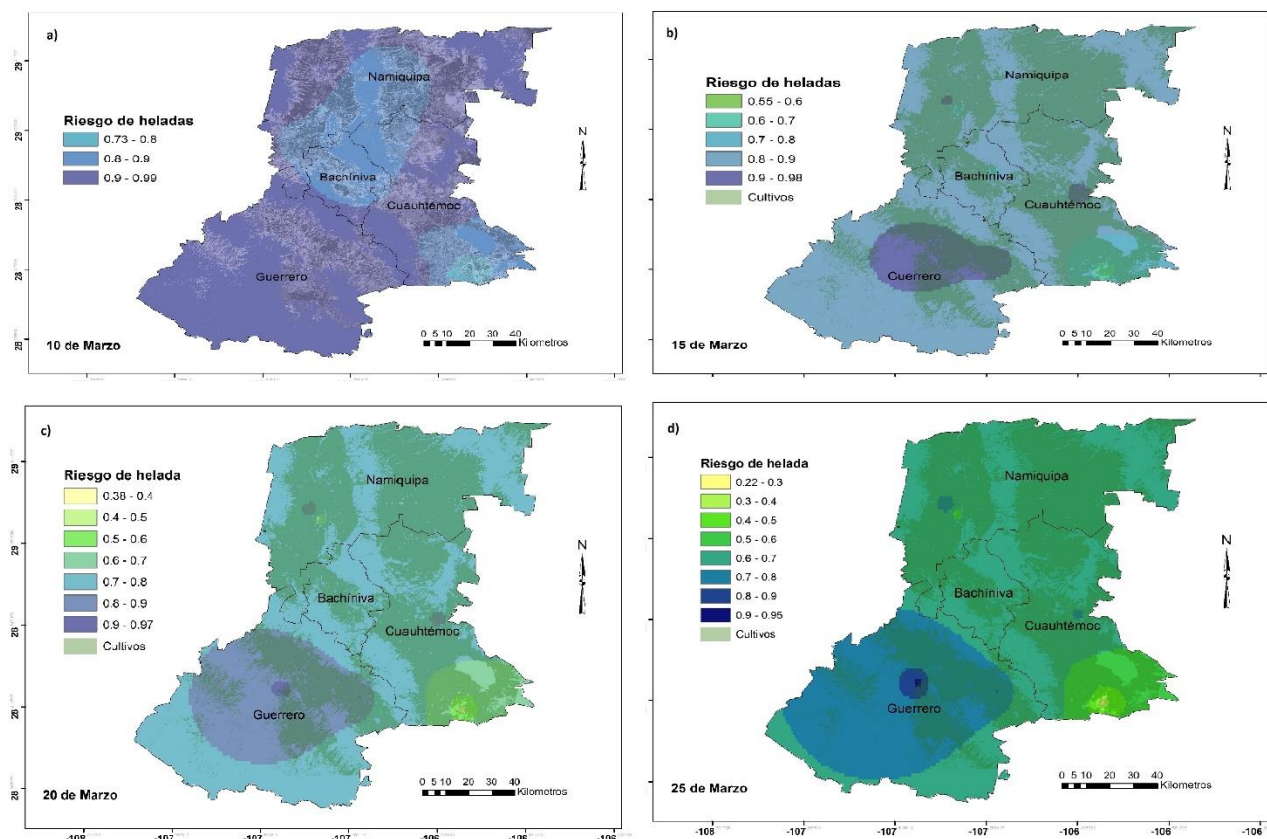


Figura 8. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el mes de marzo. a) 10 de marzo, b) 15 de marzo, c) 20 de marzo y d) 25 de marzo

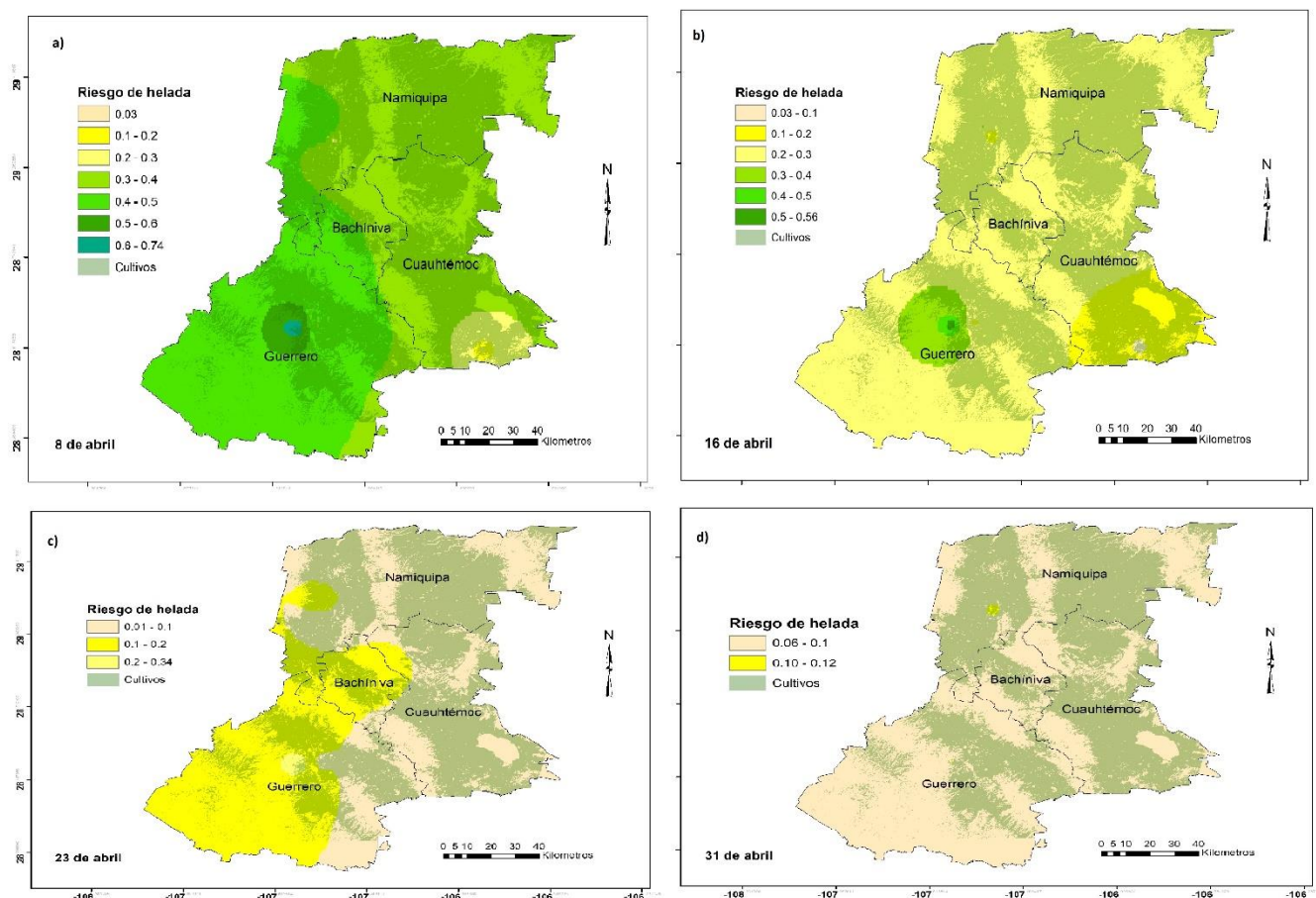


Figura 9. Probabilidad de ocurrencia de helada tardía para el mes de abril. a) 8 de abril, b) 16 de abril, c) 23 de abril y d) 31 de abril.

Los resultados muestran que las áreas con mayor riesgo son las que se encuentran a mayor altura (figura 6), sin embargo, también se puede observar que en áreas donde se localizan cultivos existe una probabilidad de heladas considerada.

Durante la floración en manzano, que es el cultivo más representativo en el área de estudio, la prevención contra el daño de heladas es fundamental, ya que la intensidad y cantidad de inversión para su manejo durante el ciclo de floración, depende de todos los eventos colaterales que ocurren durante esta etapa (Ramírez–Legarreta et al., 2008). Este tipo de mapas son de gran utilidad para la correcta planificación y manejo de fechas en los estadios de floración, en este caso se tomó en cuenta la temperatura que afectar el estadio de floración en manzano, sin embargo, cada estadio de floración es susceptible a diferente temperatura y

puede ser de gran importancia conocer la probabilidad de heladas para cada estadio. Al respecto, Jacobo-Cuellar et al. (2008) mencionan que una temperatura de -3 °C no afecta a yemas en ecoreposo, pero dañará yemas en punta verde y estadios posteriores, por lo que una determinada temperatura puede ser letal para estadios avanzados y a la vez ser inocua para los más retrasados.

El período de floración en manzano en cultivares como “Red Delicious” y “Golden Delicious” ocurre en la última semana de marzo y para este período, la probabilidad de heladas oscila entre el 50 a 60% para los municipios de Guerrero y parte de Bachíniva, mientras que en los municipios de Cuauhtémoc y Namiquipa la probabilidad de helada oscila entre 30 y 40%. Las flores de estas variedades permanecen abiertas durante 6 días (Thomson & Gouk, 2003), lo que provoca que exista más riesgo de daño en sus estructuras. El municipio de Guerrero es el principal productor de manzana “Golden Deliciuos” (CONACYT-SAGARPA, 2010), sin embargo, es en esta región la probabilidad oscila entre el 30 al 50% de riesgo de helada en el mes de abril, que como ya se mencionó es el mes en donde inicia el ciclo de floración de esta variedad.

Para el día 25 de marzo (figura 8), la probabilidad de 60-70 % de que ocurra una helada cubre la mayor parte del área (color amarillo), esta probabilidad puede ser considerable si el árbol se encuentra en plena floración. Además, si se compara el mapa, con un mapa de usos de suelo (figura 5), se aprecia con claridad que el uso agrícola coincide con una probabilidad de helada alta en los últimos días del mes de marzo. Variedades como “Gala” y “Golden supreme” que su ciclo de floración inicia a mediados del mes de marzo (CONACYT-SAGARPA, 2010) puede presentar un problema para el agricultor, ya que los resultados muestran que para el día 15 de marzo, como se aprecia en la figura 8 la mayor parte del área está cubierta de color azul (probabilidad de 80-90%). Esta probabilidad es de alto riesgo para esto tipo de variedades, así que, si ya se encuentra algún cultivo en la zona de riesgo, es importante que el agricultor tome medidas de prevención como cubiertas artificiales, seguro de pérdidas por heladas, utilización de abanicos, quemas de leña o rastrojo, entre otros.

Ramírez-Legarreta et al. (2008) demostraron que la brotación de “Red Deliciosos” entre el 10 y 16 de marzo, mientras que en “Golden Delicious” ocurrió durante el período del 20-28 de marzo. Es por esta razón que las bajas temperaturas están provocando que este tipo de variedades sean más propensas a ser afectados por una helada, como se puede apreciar en la figura 9, la mayor parte del área está cubierta con una probabilidad de helada de entre 50-60%. Sin embargo, estos autores también mencionan que al menos el 95% de los huertos presentes en la región tienen períodos de brotación-amarre de fruto cercanos a los 60 días, lo que provoca que la toma de decisiones para los agricultores sea más compleja, ya que pueden intervenir factores como manejo de plagas y enfermedades y manejo de daño por heladas (Ramírez-Legarreta, et al., 2008).

Cabe destacar que el daño que pueda ocasionar una helada dependerá de factores como: variedad, variabilidad de comportamiento de estadios de floración, región en la que se encuentre el huerto, entre otros (Guerrero-Prieto et al., 2006). De hecho, estos mismos autores mencionan que una helada en la región de Guerrero provocó en la etapa de floración un desfase, afectando que el polinizador no diera los resultados esperados y provocando una disminución en el cuajado o amarre de fruto.

Por esta razón es que los agricultores y técnicos deben estar atentos año con año a este tipo de cambios en el clima que pueden afectar seriamente la producción y la calidad del fruto.

Además de manzano otro cultivo muy presente en el área de estudio, es el maíz. Una helada primaveral puede afectar a cultivos anuales, como el maíz y el frijol. Sin embargo, en este caso para que la helada afecte al maíz dependerá en gran medida del estado de desarrollo de la planta (FAROOQ et al., 2009). Los resultados muestran que, para la mitad del mes de abril hay una probabilidad de ocurrencia de heladas de 20- 30 % (color rosa), además que el área que cubre este color hay una cantidad considerable de hectáreas tanto de maíz como frijol, así que es recomendable para el agricultor estar pendiente sobre las fechas de ocurrencia. Al respecto, Bremer et al. (1995), reportan que la ocurrencia de una helada en la fase

de maduración del maíz provocaría caída en la producción del maíz, el grano resultante puede ser bajo en peso, y aunque tenga buenos valores alimenticios, el precio de venta se ve reducido de forma drástica.

Es importante considerar que de acuerdo con la severidad de la helada, será la respuesta en el desarrollo de la planta del maíz (Bremer et al. 1995), pero los más comunes son; ruptura de las membranas de la célula, muerte de hojas y tallos internos, destrucción de un alto porcentaje de las flores e incluso la muerte total de la planta, deshidratación, pérdida de granos, aparecen las hojas lacias y posteriormente se secan tomando color café y una apariencia de quemadas, entre otros (Xing & Rahasekar, 2001). Se menciona todo esto para conocer la importancia de que el maíz, o cualquier otro cultivo esté plantado en un área, si es posible libre de heladas, pero si esto no sucede las cartografías de probabilidad y período libre de heladas ayudan al técnico o agricultor a tomar medidas preventivas que mitiguen los daños de efectos de las heladas.

Las cartografías de heladas tempranas muestran las superficies vulnerables a ser afectadas por la helada en los meses de septiembre, octubre, noviembre y parte de diciembre. Para el mes de octubre la probabilidad de ocurrencia de helada tiene un descenso, aun así, hay zonas que puede afectar la helada, sobre todo si en estas áreas, se encuentra suelo agrícola. En la figura 10, para el día 20 de octubre, la probabilidad que cubre el área que está en color marrón (30-40 %), hay presentes algunas huertas, aquí, aunque no es una probabilidad alta, el agricultor deberá tomar en cuenta cualquier medida que anticipe los daños de la helada. En el caso del mes de octubre se puede apreciar un aumento en la probabilidad, del día 20 al 31 de octubre, de hecho, para el 20 de octubre la probabilidad del 30 al 40 % cubre la mitad del área de estudio, mientras que para el 31 la probabilidad se encuentre entre el 60 al 70 % cubriendo $\frac{3}{4}$ partes del área de estudio.

El cultivo del frijol es un claro ejemplo del efecto negativo que pueden ocasionar las heladas tempranas, este cultivo tiene una fecha de siembra entre el 25 de mayo al 25 de julio y de riego entre el 10 de mayo y el 20 de junio, dependiendo la variedad y la región, sin embargo, puede ser propenso a heladas días antes de su cosecha

cuando la fecha de siembra se retarda y por consecuencia la fecha de cosecha también, lo que podría causar una helada temprana y un daño irremediable en su producción, ya que es un cultivo que no tolera heladas (Jacobo-Cuellar, 2015).

Para el mes de noviembre la probabilidad de helada comienza a aumentar un poco, de acuerdo a la base de datos de UNIFRUT, las temperaturas promedio para estas fechas rondan entre los 1C° y 20 °C (UNIFRUT, 2019) sin embargo, el cambio climático está provocando una variabilidad constante en las temperaturas (Ocampo, 2011) lo que afecta a la producción de los cultivos. En la figura 11 del mes de noviembre, se muestra como la probabilidad de helada sufre un cambio considerable, en tan solo 6 días (del 8 de noviembre-15 de noviembre), el área que cubre la probabilidad del 80-90% abarca la mayor parte de los municipios del área de estudio. Es importante considerar cuales son los efectos que podría causar una helada en esta temporada del año, cada cultivo o variedad es susceptible a diferente temperatura, y como se mencionó anteriormente el estado en que se encuentre el cultivo, podría definir el nivel de daño que puede causar la helada (Mártinez et al., 2008)

Como se puede observar en la figura 12 los días de diciembre, que es de esperarse, existe una probabilidad muy elevada (90-100%) de que ocurra helada, sin embargo, esta fecha no es de riesgo, debido en parte a que en esta fecha no hay cultivos en crecimiento y desarrollo, además de que frutales como manzano se encuentran en dormancia.

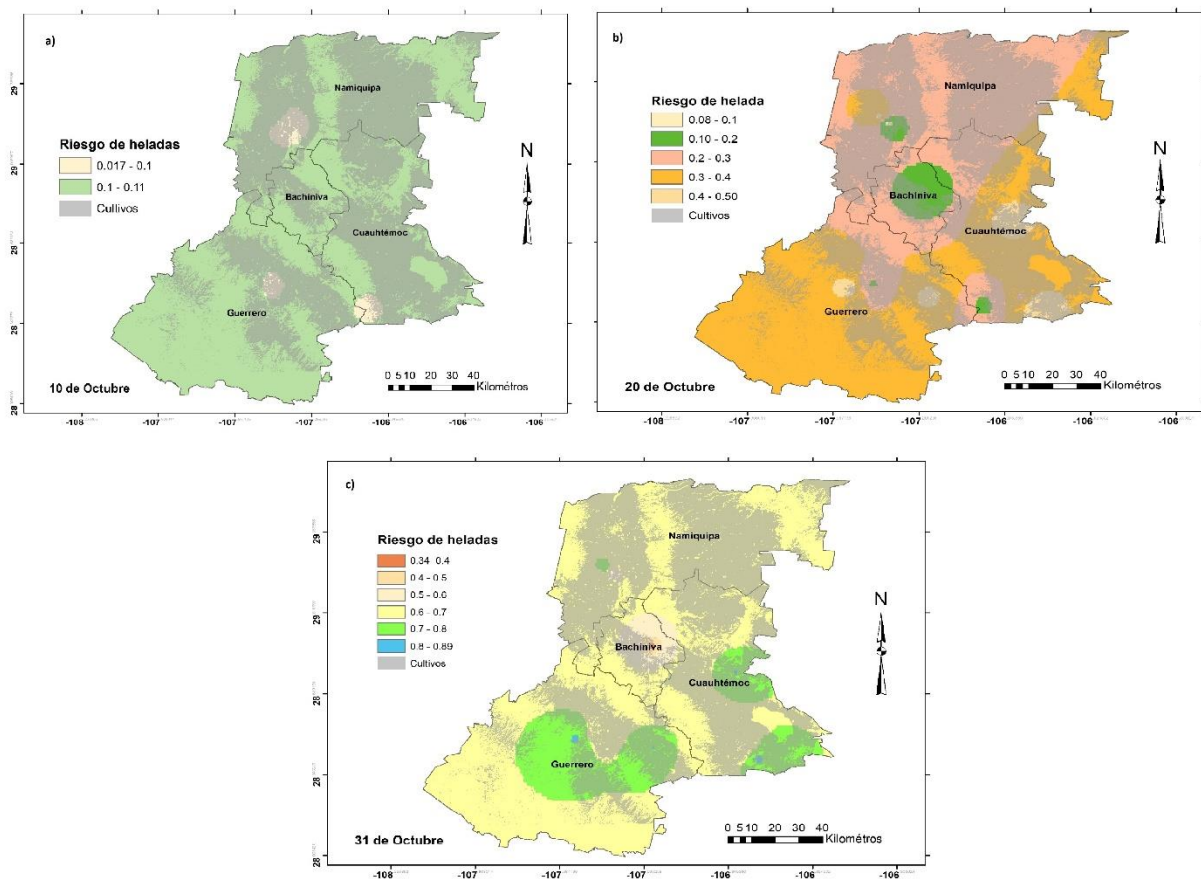


Figura 10. Probabilidad de ocurrencia de heladas tempranas para el mes de octubre. a) 10 de octubre, b) 20 de octubre y c) 31 de octubre

En cualquier zona donde se encuentre área agrícola de importancia, los agricultores deben de estar al pendiente y hacer frente a las repetitivas y siempre presentes heladas con el fin de salvaguardar sus cultivos. En la mayoría del área de estudio se utilizan procedimientos pasivos para mitigar el daño de las bajas temperaturas, sin embargo, aún es necesario la utilización de métodos activos. Uno de los primeros criterios que se toman en cuenta para evitar el daño de heladas es la selección del emplazamiento, ya que la acumulación de frío será más importante en zonas bajas que en zonas montañosas (Sánchez 2014).

Otro aspecto a considerar es el drenaje o flujo de aire frío, en este sentido, el agricultor deberá identificar la dirección predominante del flujo, para así poder controlarlo mediante el uso de vallas, setos o paredes artificiales. Además de estos

criterios, existen estudios en la región manzanera para la selección correcta de variedades y polinizadores que retarden la fecha de floración, aunque no presenta alto riesgo de ocurrencia de helada, el mes de abril que es donde inicia el ciclo de floración de algunas variedades del estado, la variabilidad en el clima causada por el efecto climático ha provocado la incidencia de helada en años anteriores y afectado de manera significativa esos cultivares (Sánchez 2014; Martínez et al., 2008).

Es importante considerar que una buena nutrición y buen estado sanitario del cultivo podrían favorecer la aclimatación y la resistencia a la congelación, además de que una poda también ayudaría a retrasar la floración primaveral (Sánchez 2014; Morales et al., 2016).

Por otro lado, en la zona de estudio al ser considerada un área con bajas temperaturas los agricultores siempre optan por utilizar además de métodos pasivos, métodos activos; como aspersores, ventiladores, estufas, entre otros.

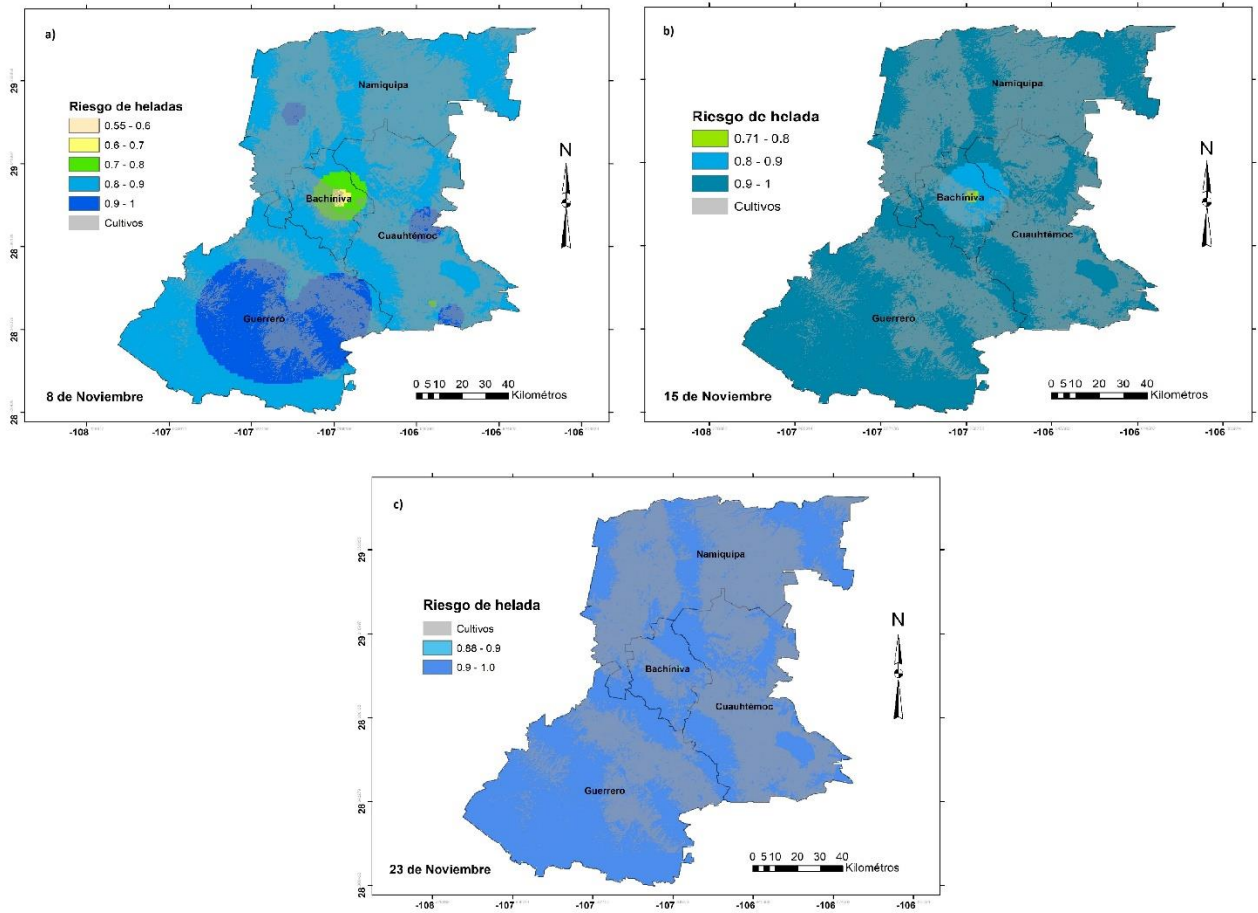


Figura 11. Probabilidad de ocurrencia de helada temprana para el mes de noviembre. a) 8 de noviembre, b) 15 de noviembre y c) 23 de noviembre

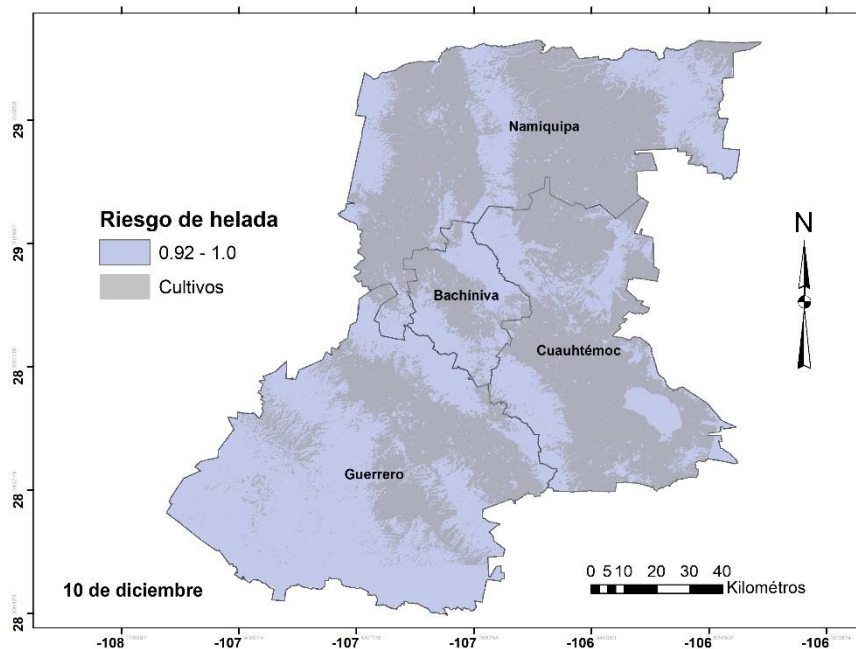


Figura 12. Probabilidad de ocurrencia de helada temprana para el 10 de diciembre

4.4 Validación de cartografías

Los resultados de la validación mediante los estadísticos RMSE y bondad de ajuste indican que las cartografías resultantes del método de interpolación IDW fueron satisfactorias, de acuerdo a los criterios de evaluación cualitativa de bondad de ajuste, propuesta por Ritter et al. (2014). La figura 10 representa los datos de las tendencias, valores registrados (Measured), frente a los generados por el método de interpolación IDW (predicted). Las gráficas presentan los días 8,16 y 23 de abril como ejemplificación de los faltantes días interpolados, ya que en todos se puede observar una tendencia similar en los datos. Se puede observar que entre los puntos se encuentren más separados de la línea, mayor es el error del método de interpolación.

En el cuadro 5 se indican los valores del estadístico RMSE y el coeficiente de bondad de ajuste, aunque los valores que se obtuvieron no son demasiados altos, un mayor número de datos proporcionaría al método IDW una mayor exactitud.

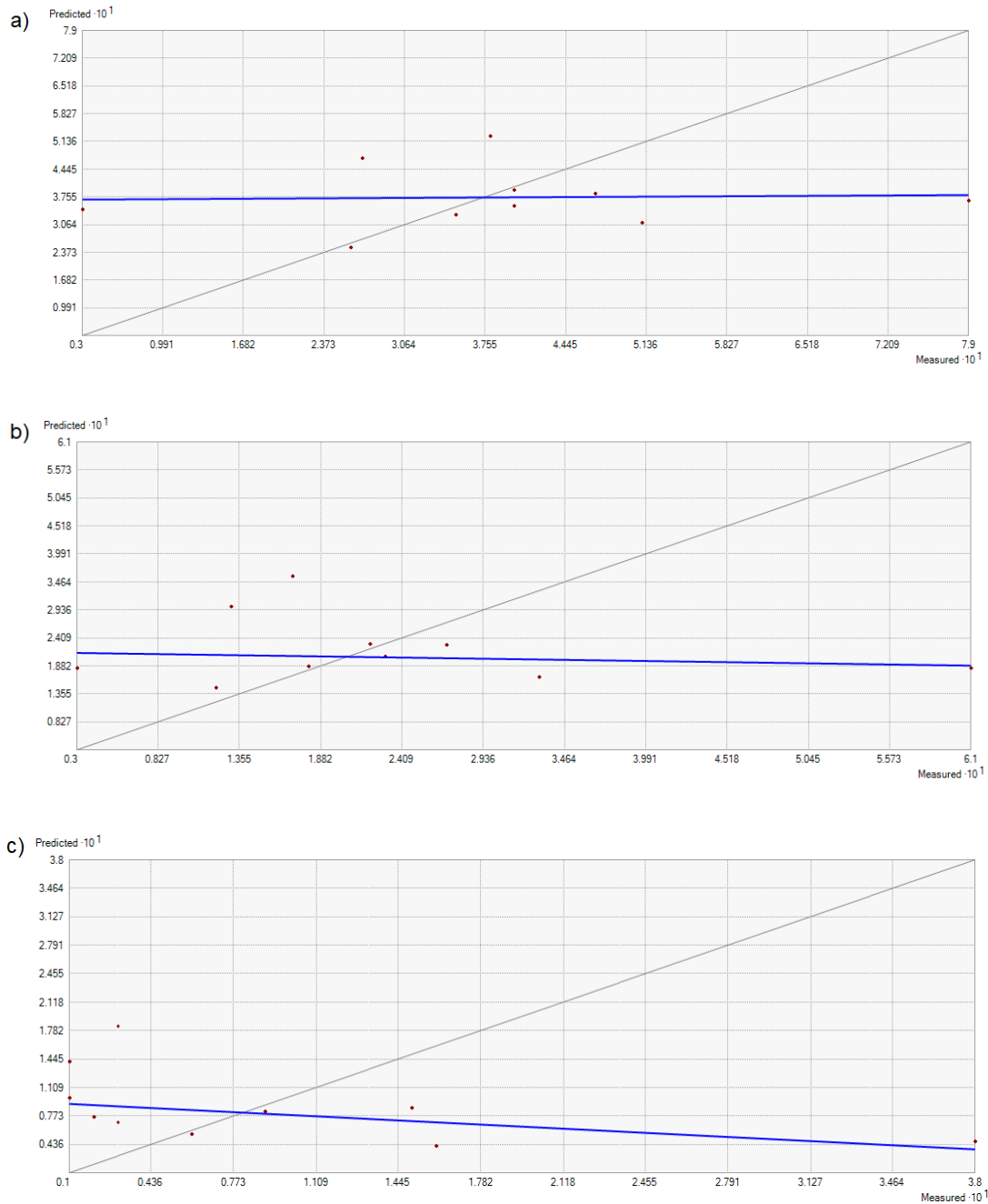


Figura 13. Validación cruzada del modelo de interpolación IDW. a) 8 de abril, b) 16 de abril y c) 23 de abril.

Cuadro 5. Coeficiente error medio cuadrático (RMSE), bondad de ajuste y ceff (coeficiente de bondad de ajuste)

Día	RMSE	Bondad de ajuste	Ceff
10 de marzo	0.0014	1.44	0.99
15 de marzo	0.023	14.76	0.97
20 de marzo	0.027	15.25	0.97
25 de marzo	0.042	21.41	0.97
31 de marzo	0.033	14.41	0.97
8 de abril	0.02	17.18	0.70
16 de abril	0.17	0.26	0.90
23 de abril	0.05	0.33	0.70
30 de abril	0.01	0.29	0.86
15 de septiembre	0.04	1.20	0.83

4.5 Período libre de heladas.

El cuadro 6 muestra los días libres de helada para cada estación. Aquí el cuadro 6, indica una probabilidad de 5% de que ocurra una helada y un 95% de que no ocurra, la información reflejada en este cuadro es la más certera para poder conocer el período libre de heladas en la región oeste del estado de Chihuahua.

Cuadro 6. Número de días libres de heladas (DLH) con 5, 25, 50, 75 y 95 % de probabilidad.

Estación	NDLH (%)				
	95	85	50	25	5
Álvaro Obregón, Cuauhtémoc	166	188	188	217	241
Casa blanca, Guerrero.	162	174	174	201	232
El Rosario, Guerrero	171	184	184	227	248
Las Varas, Bachíniva	172	198	198	238	295
Mesa Miñaca, Guerrero	177	194	194	223	244
Namiquipa Alto	179	203	203	236	264
Namiquipa Bajo	167	182	182	209	238
Quintas Lupitas, Cuauhtémoc	175	197	197	239	250
San José de la Herradura	171	195	195	228	260
Zona Dorada, Cuauhtémoc	190	206	206	229	251

4.5 Ubicación de sensores de temperatura (dataloguer)

Los geoprocесamientos utilizados mediante un Sistema de Información Geográfica permitieron identificar un área fiable para la ubicación de sensores de temperatura. El área identificada se encuentra con pendientes $\leq$ a 19° , no afecta la sombra y no hay obstrucciones cercanas. Además, como conocimiento previo de algunos agricultores y técnicos se eligieron puntos los cuales se encontraban cerca de huertas y parcelas, lejos de la zona urbana y tomando en cuenta la distancia entre estaciones, ya que algunas de las pocas estaciones presentes en el área de estudio se encuentran muy distanciadas (≥ 10 km). La figura 14 presenta la intersección de los mapas clasificados de pendientes, orientación de laderas y sombreado, donde es el resultado es una cartografía con el área idónea (página 49) para la ubicación de termómetros. Los puntos en color azul son las estaciones que se decidieron poner para obtener resultados más satisfactorios en próximos estudios, se puede

observar cómo se encuentran dentro del área idónea y además cerca del suelo agrícola.

El cuadro 7 muestra las características geográficas de las nuevas estaciones.

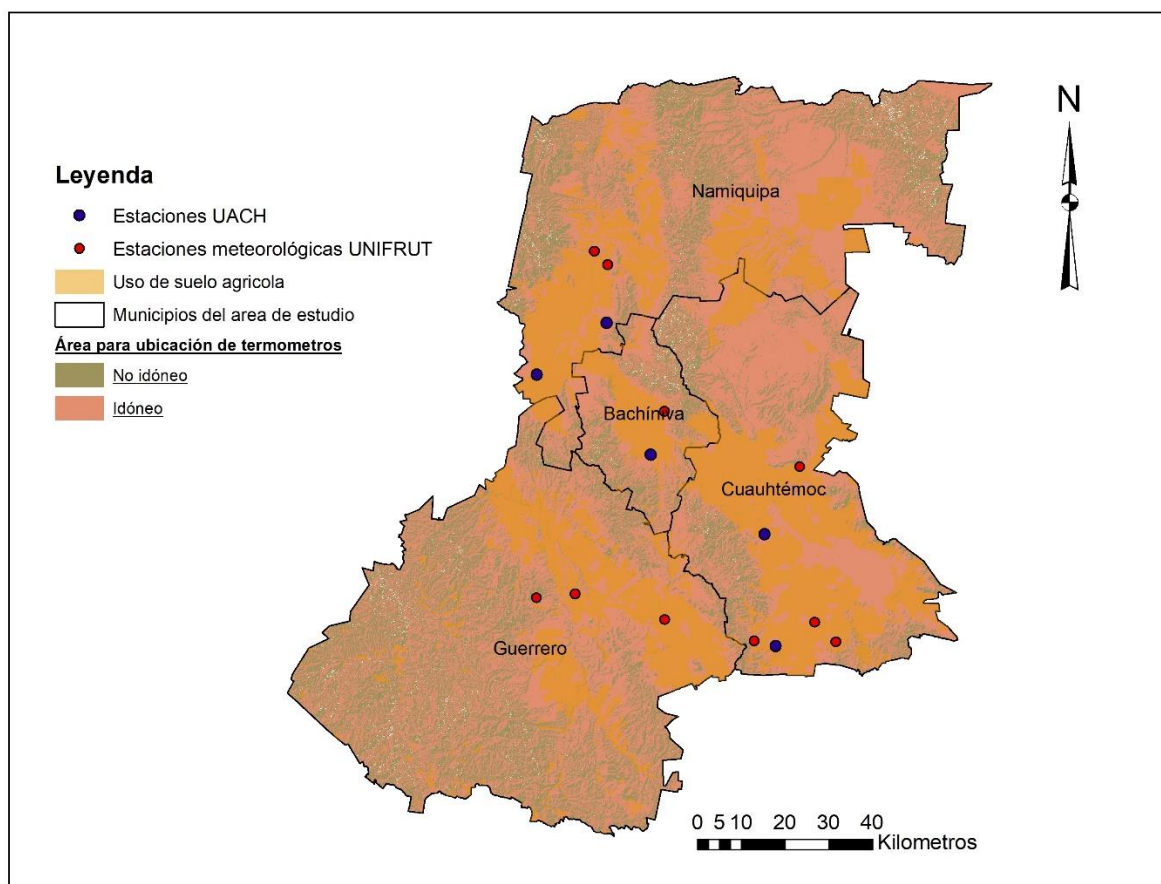


Figura 14. Área idónea/No idónea para la ubicación de estaciones meteorológicas.
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7. Ubicaciones geográficas de las nuevas estaciones.

Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Campo 7C, Cuauhtémoc	-107°0'0"	28°37'48"	2027
Malpaso, Cuauhtémoc	-106°58'12"	28°24'0"	2149
INIFAP, Bachíniva	-107°16'12"	28°47'24"	2016
Huerta la semilla	-107°32'24"	28°57'0"	1908

Huerta Rafa Duran	-107°22'48"	29°3'36"	1916
-------------------	-------------	----------	------

4.6 Generación y validación de cartografías de temperaturas horarias

Los resultados de la validación del interpolador IDW en cuanto a temperaturas horarias se pueden observar en el cuadro 8. El RMSE es para el día 1 de agosto en sus 24 horas, obsérvese que, a pesar de haber agregado 5 sensores de temperatura para una mejor exactitud de los resultados, en este caso el objetivo no se cumplió. Los valores del estadístico RMSE fueron altos en comparación a los generados para la probabilidad de heladas. Cabe destacar, que hasta el momento no existen estudios en la región en donde la interpolación por el método IDW sea validada en datos de temperatura horaria. Sin embargo, este resultado nos deja una puerta abierta para futuras investigaciones, en donde será recomendable agregar un mayor número de estaciones meteorológicas en el área que ya se identificó como idónea para la ubicación de termómetros, así como la comparación de diferentes métodos de interpolación para datos de temperatura horaria. Será así, como se pueda lograr una cartografía precisa en cuanto a interpolación de temperatura horaria y poder usarla para el cálculo de estimadores que lo requieran.

Cuadro 8. Valores del error medio cuadrático (RMSE) en centígrados para el primero de agosto

Hora	RMSE	Hora	RMSE
1	1.97	13	2.57
2	3.09	14	1.89
3	1.63	15	3.04
4	0.36	16	3.85
5	2.06	17	3.90
6	3.17	18	4.00
7	3.84	19	4.89
8	4.98	20	4.38

9	4.6	21	3.99
10	4.98	22	4.24
11	4.48	23	3.22
12	4.33	24	2.21

En este resultado no se agregaron las cartografías ya que como se mencionó anteriormente fueron poco exactas, sin embargo, se pueden consultar en la siguiente liga:

https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/arelyv2895/holaa.

En donde cualquier usuario las puede observar a través de la plataforma Google Earth Engine.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron asociar la probabilidad de heladas tardías de manera dinámica para temperaturas ≤ -2 °C, con sitios geográficos durante el período de floración de frutales caducifolios y de la misma forma, la probabilidad de heladas de manera dinámica para temperaturas de 0 °C por sitio geográfico durante el período de madurez fisiológica de cultivos anuales (heladas tempranas). De acuerdo con la cartografía de probabilidad de heladas, se identifica que las áreas de mayor riesgo de heladas se registran en los municipios de Bachíniva y Guerrero. En período libre de heladas, los datos de temperatura indican que, en el Municipio de Cuauhtémoc, Chih., el área que circunda a la conocida como Zona dorada, es la que presenta mayor días libres de heladas con una probabilidad del 95% de que no ocurra helada.

VI.LITERATURA CITADA

Aguilar, R. R., & Mora, A. A. (2004). Modelación del comportamiento de las isotermas, isoyetas y cálculo de la radiación solar para el estado de Puebla durante el mes de junio de 2004.

Alberola-Romá, A. (2006). Los problemas de primavera y verano en la agricultura. Notas acerca de granizos y heladas en tierras valencianas durante el siglo XVIII. *Pedralbes: Revista d'història moderna*, (26), 11-40.

Alzate-Velásquez, D. F., Araujo-Carrillo, G. A., Rojas-Barbosa, E. O., Gómez-Latorre, D. A., & Martínez-Maldonado, F. E. (2018). Interpolación regnie para lluvia y temperatura en las regiones andina, caribe y pacífica de Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 102-118.

Arredondo, J. J., Gutiérrez, H. A., Juárez, N. C., & Montes, F. I. O. (2013). Situación Económica de la producción de maíz en condiciones de riego en el estado de Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 33, 504-512.

Barrios-Gómez, E. J., & López-Castañeda, C. (2009). Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*, 43(1), 29-35.

Bellhouse, D. R. (2011). *Abraham de Moivre: Setting the stage for classical probability and its applications*. CRC Press.

Brewer, C. A. (2005). Designing better maps. *A Guide for GIS Users*, 1.

Cardoso, J. C. (2011). Agrometeorología, la importancia de su desarrollo técnico. Sistemas de informacion y cooperacion.

Chakrabarti, B., Singh, S. D., Nagarajan, S., & Aggarwal, P. K. (2011). Impact of temperature on phenology and pollen sterility of wheat varieties. *Australian journal of crop science*, 5(8), 1039-1043.

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287-291.

Comino, J. R. (2013). Cuantificación de los gradientes térmicos a nivel superficial a lo largo del Rheinland-Pfalz (Renania-Palatinado, Alemania). *BAETICA. Estudios de Historia Moderna y Contemporánea*, (35), 75-97.

CONABIO. (2012). Portal de geoinformación. [En línea] Available at: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Último acceso: OCTUBRE 2019].

CONACYT-SAGARPA, D. & E. (2010). Programa elaboración de casos éxitos de innovación en el sector agroalimentario, México: Leticia Deschamps Solórzano.

Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., Martínez-Meyer, E., & Ortiz, E. (2014). Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(2), 187-201.

Da Silva, L. F., Alves, H. M. R., Viera, T. G., Volpato, M. M., & Borém, F. M. (2013). Avaliação de interpoladores espaciais para representação da temperatura do ar na região da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais.

Dexter, J. E., Marchylo, B. A., & Mellish, V. J. (1994). Effects of frost damage and immaturity on the quality of durum wheat. *Cereal chemistry*, 71(5), 494-500.

Díaz, M. F. (2015). Interpolación espacial con sistemas de información geográfica. Primera Edición, septiembre de 2015 ed. Santiago de Chile – Chile: Editorial triángulo.

Díaz, D. P., Cruz, S. J. B., López, M. T., & Sesma, J. A. A. P. (2009). Período libre de heladas para el Estado de Aguascalientes y su relación con El Niño. *Investigación y Ciencia*, 17(45), 12-23.

Escourrou, G. (1981). *Climat et Environnement. Les facteurs locaux du climat* (No. 551.6 E74c). París, FR: Masson.

Esperbent, C. E. (2017). *El cambio del clima deja su huella en la agricultura*. Gerencia de Comunicación e Imagen Institucional, DNA SICC, INTA.

ESRI, (2016). ArcMap. [En línea] Available at: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm> [Último acceso: 13 agosto 2020].

Esteller, M. V., Quentin, E., & Díaz-Delgado, C. (2002). Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos. *Hidrogeología*, 2.

FAO, (2010). Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía, Rome, Italy.

Farooq, M., Aziz, T., Wahid, A., Lee, DJ y Siddique, KH (2009). Tolerancia al frío en maíz: enfoques agronómicos y fisiológicos. *Ciencia de cultivos y pastos*, 60 (6), 501-516.

Florido-Bacallao, M., & Bao Fundora, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos tropicales*, 35(3), 70-88.

Fries, A., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., Nauss, T., Homeier, J., Peters, T., & Bendix, J. (2009). Thermal structure of a megadiverse Andean mountain ecosystem in southern Ecuador and its regionalization. *Erdkunde*, 321-335.

González-Botero, D. F. (2018). Planteamiento de un modelo de predicción de heladas en cultivos de Rosa en la Sabana de Bogotá.

Google, (2020). Earth Engine Code Editor. [En línea] Available at: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground> [Último acceso: 12 septiembre 2020].

Gotway, C. A., Ferguson, R. B., Hergert, G. W., & Peterson, T. A. (1996). Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1237-1247.

Gusta, LV y O'connor, BJ (1987). Tolerancia a las heladas del trigo, avena, cebada, canola y mostaza y el papel de las bacterias nucleadoras del hielo. *Revista canadiense de ciencia vegetal*, 67 (4), 1155-1165.

Hartkamp, A. D., De Beurs, K., Stein, A., & White, J. W. (1999). Interpolation techniques for climate variables.

INEGI. (2019). Anuario estadístico y geográfico de Chihuahua 2017, Chihuahua.

INIFAP. (2008). Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura, Chihuahua.

INIFAP. (2015). Paquete Tecnológico para maíz de temporal, Chihuahua.

IPCC. (2019). Comunicado de prensa del ipcc, Ginebra: <https://www.ipcc.ch/>.

Izquierdo-Hernández, A., Armenteros-Borrell, M., Lancés-Cotilla, L., & Martín González, I. (2004). Alimentación saludable. *Revista cubana de enfermería*, 20(1).

Jacobo-Cuellar. J. L. (2015). Paquete tecnológico para frijol de riego y temporal (INIFAP), Chihuahua.

Johnston, K., Ver Hoef, JM, Krivoruchko, K. y Lucas, N. (2001). *Utilizando el analista geoestadístico de ArcGIS* (Vol. 380). Redlands: Esri.

Koide, N., Robertson, A. W., Ines, A. V., Qian, J. H., DeWitt, D. G., & Lucero, A. (2013). Prediction of rice production in the Philippines using seasonal climate forecasts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3), 552-569.

Kravchenko, A. N. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1564-1571.

Labuschagne, M. T., Elago, O., & Koen, E. (2009). The influence of temperature extremes on some quality and starch characteristics in bread, biscuit and durum wheat. *Journal of Cereal Science*, 49(2), 184-189.

Leal-Nares, O. A., Mendoza, M. E., & Carranza-González, E. (2010). Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. *Investigaciones geográficas*, (72), 49-67.

Lobell, DB, Hammer, GL, McLean, G., Messina, C., Roberts, MJ y Schlenker, W. (2013). El papel fundamental del calor extremo para la producción de maíz en los Estados Unidos. *Cambio climático de la naturaleza*, 3 (5), 497-501.

Mercado López, Y. J. (2018). Análisis de la vulnerabilidad a la variabilidad climática de los medios de vida productivos agrícolas de los pequeños productores en el municipio de Tisma, corredor seco de Nicaragua (No. Thesis M553a). CATIE, Turrialba (Costa Rica).

Machado, D., Puche, M., Vilorio, J., Parra, M., & Primera, M. (2007). Geoespacialización de información climática mediante la utilización de sistemas de Información Geográfica. *Caso Cuenca Alta del río Guánico. II Jornadas Nacionales de Geomática*, 3.

Martínez, L., Ibacache, A., & Rojas, L. (2008). Las heladas en la agricultura. *Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.

Magaña-Rueda, V. O. (2013). Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático.

Morales, A. P. (2016). Riesgo de heladas en cultivos. Análisis y evaluación. In *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía: Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil* (pp. 1005-1022). Instituto Interuniversitario de Geografía.

McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of hydrologic engineering*, 11(6), 597-602.

Medina García, G., Grageda Grageda, J., Ruiz Corral, J. A. & Báez González, A. D. (2008). Uso de Estaciones Meteorológicas en la agricultura, México, D.F.

Miranda, J. & Royo, B. (2004). El modelo estadístico estima los rendimientos potenciales en manzanas "Golden Delicious" y "Royal Gala" antes de la floración. *Revista de la Sociedad Americana de Ciencias Hortícolas*, Volumen 129, 20-25.

Morales, A. P. (2016). Riesgo de heladas en cultivos. análisis y evaluación. In *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía: Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil* (pp. 1005-1022). Instituto Interuniversitario de Geografía.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). Pronóstico del caudal de los ríos a través de modelos conceptuales, parte I: una discusión de los principios. *Revista de hidrología*, 10(3): 282-290.

Ocampo, O. (2011). El cambio climático y su impacto en el agro. *Revista de ingeniería*, (33), 115-123.

Ordaz, J. L., Mora, J., Acosta, A., Serna-Hidalgo, B., & Ramírez, D. (2010). Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura.

Ovando, G., Bocco, M., & Sayago, S. (2005). Redes neuronales para modelar predicción de heladas. *Agricultura Técnica*, 65(1), 65-73.

Parra-Quezada, R. A., Acosta-Rodríguez, G. F., & Arreola-Ávila, J. G. (2005). Crecimiento y producción de zarzamora cv. Cheyenne con cubiertas orgánicas. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 233-240.

Prieto, V. M. G., Chacón, A. R., Avitia, J. A. O., Reyes, D. I. B., Béjar, A. A. G., & Quezada, R. Á. P. (2006). Polinización en manzanos red delicious y golden delicious. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 41-45.

Quevedo, H., & Sanchez, A. (2009). Geometric description of BTZ black hole thermodynamics. *Physical Review D*, 79(2), 024012.

Quiroga, S., & Iglesias, A. (2005). Relación entre el clima y la productividad agraria: Diferencias regionales y entre cultivos. *Obtenido de Infoagro: http://www.infoagro.com/hortalizas/relacion_clima_cultivo2.htm*.

Ramírez-Legarreta, M. R., Jacobo-Cuéllar, J. L., Gardea-Béjar, A. A., & Parra-Quezada, R. Á. (2008). Modelo de desarrollo floral en manzanos [*Malus sylvestris* (L.) Mill. var. *domestica* (Borkh) Mansf.] red delicious y golden delicious como herramienta de toma de decisiones en el manejo integrado de enfermedades. *Revista mexicana de fitopatología*, 26(2), 153-163.

Ritter, A., Muñoz Carpena, R. & Regalado, C. M. (2010). Capacidad de modelos de predicción aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. Universidad de La Laguna. Ctra. Geneto.

Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., Regalado, CM, Vanclooster, M. y Lambot, S. (2004). Análisis de estrategias de medición alternativas para la optimización inversa

de las propiedades hidráulicas de un suelo volcánico. *Revista de hidrología*, 295(1-4), 124-139.

Rojas, E., Arce, B., Peña, A., Boshell, F., & Ayarza, M. (2010). Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 173-182.

Salcedo, I. A. L., & Carvajal, O. A. A. (2011). Aplicaciones de la agricultura de precisión en palma de aceite “*Elaeis Guineensis*” e híbrido O x G. *Revista de ingeniería*, (33), 124-130.

Sakamoto, T., Van Nguyen, N., Ohno, H., Ishitsuka, N., & Yokozawa, M. (2006). Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 100(1), 1-16.

Soto Mora, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones geográficas*, (50), 173-195.

Ramírez, M., & Salcedo, J. (2013). Los recursos fitogenéticos y la importancia estratégica de su conservación en las Américas. *en América Latina y el Caribe*, 15.

Sánchez, D. E. (2014). Riesgo de heladas por inversión térmica en la huerta de Murcia: incidencia en la actividad agraria. *Investigaciones Geográficas (Esp)* 64:73-86.

Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E., & Jacobs, M. J. (2001). Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil science society of America journal*, 65(2), 470-479.

Secretaría de Desarrollo Rural. (2017-2021). programa sectorial secretaría de desarrollo RURAL 2017-2021, Chihuahua, Chihuahua: anexo al periódico oficial.

Secretaría de economía (2015). Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. parte 2: especificaciones técnicas que deben cumplir el

emplazamiento y exposición de los instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales.

Sendra, J. B. (1994). Sistema de información geográfica. *Estudios Geográficos*, 55(214), 201.

SIAP. (2018). Programa sectorial 2018.

SIAP (2019). Atlas agroalimentario 2012-2018, Ciudad de México.

Snyder, R. L., Melo-Abreu, J. P., Matulich, S., Villar-Mir, J. M., & Millán, J. (2010). Protección contra las heladas: fundamentos, práctica economía. Volumen 2. *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*, 2, 1-80.

Sugiyama, M., Akashi, O., Wada, K., Kanudia, A., Li, J., & Weyant, J. (2014). Energy efficiency potentials for global climate change mitigation. *Climatic change*, 123(3), 397-411.

Thomson, S. V., & Gouk, S. C. (2003). Influence of age of apple flowers on growth of *Erwinia amylovora* and biological control agents. *Plant Disease*, 87(5), 502-509.

Tobajas García, A. (2016). Diseño e implementación de una estación meteorológica con Raspberry Pi.

Uva, M., & Campanella, O. (2009). AP-SIG: un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. In *XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.

Vargas, A., Santos, A. N. A., Cárdenas, E., & Obregón, N. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *Dyna*, 78(167), 151-159.

Vázquez Gálvez, F. A. (2012). Servicio Meteorológico Nacional: 135 años de historia en México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Vilatte, C. A., & Nogueira, B. R. (2008). Régimen y riesgo agroclimático de heladas en Lugo, provincia de Lugo, Galicia, España. *Recursos Rurais*, (4), 13-18.

Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*.

World Meteorological Organization. (1992). International Meteorological Vocabulary. 2a ed. Geneva-Switzerland.

Wutke, E. B., Brunini, O., Barbano, M. T., Castro, J. D., Gallo, P. B., Kanthack, R. A. D., ... & Silveira, L. C. P. (2000). Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 8(1), 55-61.

Wutke, E. B., Brunini, O., Barbano, M. T., Castro, J. D., Gallo, P. B., Kanthack, R. A. D., ... & Silveira, L. C. P. (2000). Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 8(1), 55-61.

Xing, W., & Rajashekar, C. B. (2001). Glycine betaine involvement in freezing tolerance and water stress in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental and Experimental Botany*, 46(1), 21-28.

Zhang, K. y Frey, HC (2006). Estimación de la pendiente de la carretera para el modelado de emisiones de vehículos en carretera utilizando detección de luz y datos de rango. *Revista de la Asociación de Gestión de Residuos y Aire*, 56 (6), 777-788.