



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE
HELADAS EN LOS ESTADO DE TLAXCALA Y PUEBLA**

VICENTE MORA GARCÍA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

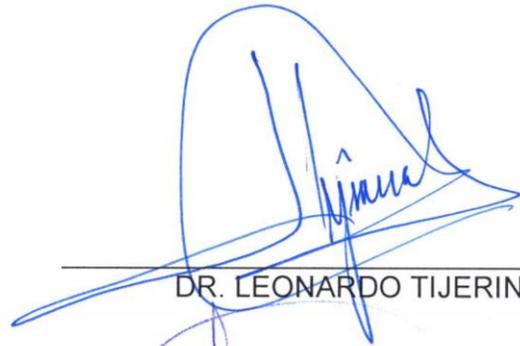
2015

La presente Tesis, Titulada: “**Determinación de la probabilidad y ocurrencia de heladas en los estados de Tlaxcala y Puebla**”, realizada por el alumno: **Vicente Mora García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

ASESOR



DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO

ASESOR



DR. AGUSTÍN RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA

Vicente Mora García, M.c.

Colegio de Postgraduados, 2015.

Las heladas constituyen uno de los fenómenos ambientales que causan graves daños en la agricultura de amplias regiones del mundo. México es afectado año con año por diferentes fenómenos de origen meteorológico, que puede provocar principalmente pérdidas a la agricultura e imponer restricciones como la disponibilidad de agua durante el ciclo vegetativo de las plantas, sobre todo durante las etapas críticas de desarrollo, lo que determina los volúmenes de cosecha y rendimiento de los cultivos.

Por tal motivo es fundamental reconocer que para disminuir los desastres, es indispensable evaluar y disminuir la condición de riesgo que los provoca. Es allí en donde las nuevas tecnologías asociadas a la integración de información geográfica y geoespacial cobran gran importancia, que permita implementar métodos de prevención de daños y aplicación de estrategias de manejo, que determinen una correcta planificación de las fechas de siembra.

En los estados de Tlaxcala y Puebla, la cuantificación de riesgo de heladas es poco disponible, por lo que surgió la necesidad de contar con estadísticas climatológicas actualizadas para apoyar las áreas de investigación, planeación y desarrollo agrícola, pecuario y forestal. Con la información de 51 estaciones meteorológicas se permitió caracterizar de manera precisa el fenómeno de las heladas en dicha región, se obtuvo información con diferentes probabilidades de ocurrencia de la primera, última helada y el período libre de heladas, realizando mapas de probabilidad y ocurrencias de heladas mediante técnicas cartográficas de Sistemas de información geográfica (SIG), útiles para alertar al agricultor para que pueda tomar las medidas necesarias y disminuir o evitar los efectos de las heladas.

Palabras Clave: Fenómeno, Riesgo, Prevención de daños, Periodo libre de heladas.

DETERMINATION OF THE PROBABILITY AND OCCURRENCE OF FROST IN THE STATES OF TLAXCALA AND PUEBLA

Vicente Mora García, M.c.

Colegio de Postgraduados, 2015.

Frost is one of environmental phenomena that cause serious damage to agriculture in vast regions of the world. Mexico is affected every year by different phenomena of weather, which may cause losses to the agriculture mainly and impose constraints such as the availability of water during the cycle of vegetation of plants, especially during critical development stages, what determines the volumes of harvesting and crop yield.

For this reason is essential to recognize that, to reduce disasters, it is essential to assess and then decrease the status of risk that causes them. Where the new technologies associated with the integration of geográfic information and geospatial take importance, where it allows implement methods of preventing damage and management strategies, that determinine a correct planning of the planting dates.

In the States of Tlaxcala and Puebla, the quantification of risk of frost, is lack of available, so it became necessary to have update weather statistics to support research, planning and development agricultural, livestock farming and forest. With information of 51 weather stations were used that allowed characterize in a precise way the phenomenon of frosts in these regions, information with different probabilities of occurrence of the first, last frost and the free period of frost were obtained, and probability maps and occurrences of frost using geografic information system (GIS) were made, useful to alert the farmer to take the necessary measures and reduce or avoid the effects of frost.

Key words: Phenomenon, Risk, Damage prevention, Frost free period

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados (COLPOS) por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica ya que sin ellos no hubiera sido posible la realización de los mismos.

Al Dr. Leonardo Tijerina Chávez, por su gran disposición, asesoría y orientación del presente trabajo, así como la confianza proporcionada.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno, por su atención, disposición y observaciones para poder concluir este trabajo.

Al Dr. Agustín Rodríguez González, por su amistad, confianza y orientación del presente trabajo.

Al personal académico, administrativo y trabajadores, por su tiempo brindado en mi estancia, que gracias a ellos las actividades planteadas fueron realizadas.

DEDICATORIA

A mis padres: Rosario Mora Fernández y Silvina García Valerio, por brindarme su amor, confianza, apoyo y guiarme en cada momento de mi vida que en cada tropiezo me han sabido levantar.

A mis hermanos: Jorge, Cristóbal y Joel que me brindaron su tiempo en la niñez haciendo de una etapa agraciada, por su gran amistad, apoyo, confianza y sobretodo comprensión en todo momento, siendo también muy importantes para el fortalecimiento de mi vida académica.

A mis primos que también fueron parte fundamental, que estuvieron al pendiente de mí en todo momento dando ánimos y apoyándome incondicionalmente.

A mis amigos con quien compartimos momentos de alegría pero también de tristeza y angustias, que siempre están ahí cuando se necesita.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	3
	2.1. Objetivo General	3
	2.2. Objetivos particulares	3
III.	HIPÓTESIS	4
IV.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
	4.1. Definición de heladas	4
	4.2. Elementos meteorológicos que afectan la formación de heladas	7
	4.2.1. Viento.....	7
	4.2.2. Nubosidad	8
	4.2.3. Humedad atmosférica.....	8
	4.2.4. Radiación solar	8
	4.3. Clasificación de las heladas	9
	4.3.1. Época de ocurrencia	10
	4.3.2. Proceso físico.....	11
	4.3.3. Efectos visuales.....	12
	4.4. Daños por heladas	12
	4.4.1. Primer grado.....	12
	4.4.2. Segundo grado	13
	4.4.3. Tercer grado.....	13
	4.4.4. Cuarto grado	13
	4.5. Gradiente térmico en altura	15
	4.6. Primera y última helada	15
	4.7. Periodo libre de heladas	16
	4.8. Parámetros agrícolas para la determinación de heladas	18
V.	MARCO DE REFERENCIA	20

5.1. Ubicación.....	20
5.2. Clima.....	20
5.3. Temperatura.....	20
5.5. Agricultura.....	21
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	28
6.1. Zona de estudio	28
6.2. Información climatológica	29
6.3. Determinación de la probabilidad de heladas	32
6.4. Determinación del Periodo Libre de Heladas (PLH)	37
6.5. Generación de los mapas de riesgo.....	39
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
7.1. Discusión.....	48
VIII. COCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
8.1. Conclusiones.....	55
8.2. Recomendaciones.....	55
IX. LITERATURA CITADA.....	56
X. ANEXOS.....	62

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Temperatura de daño por heladas (°C) a frutales en diferentes etapas fenológicas de su desarrollo (Burgos, 1963).....	13
Cuadro 2.	Temperatura de daño por heladas (°C) a cultivos en diferentes etapas fenológicas de su desarrollo (Ventskevich, 1961).	14
Cuadro 3.	Variedades de maíz adaptadas a la región de los Valles Altos. CAETECA, CIAMEC, 1981.	22
Cuadro 4.	Principales características de las variedades de maíz y época de siembra para condiciones de temporal. CAEVAMEZ, CIAMEC, INTA, 1981.	23
Cuadro 5.	Principales características agronómicas de las variedades de trigo aptas para su siembra en los Valles Altos de México. CAEVAMEX, 1981.....	24
Cuadro 6.	Variedades de cebada para grano recomendada para el estado de Puebla. CAETECA, CIAMEC, INIA, SARH 1981.	25
Cuadro 7.	Principales cultivos en el Estado de Puebla	26
Cuadro 8.	Principales cultivos en el Estado de Tlaxcala	27
Cuadro 9.	Ciclo vegetativo de los cultivos predominantes en los estados de Tlaxcala y Puebla.....	28
Cuadro 10.	Estaciones climatológicas utilizadas en el Estado de Puebla.....	31
Cuadro 11.	Estaciones climatológicas utilizadas en el Estado de Tlaxcala	32
Cuadro 12.	Fechas de la primera y última helada de la estación Santa Cruz, Coyotepec, Puebla. Período 1984-2009.	33
Cuadro 13.	Probabilidad de ocurrencia de la primera, última y período libre de heladas, de las estaciones climatológicas del estado de Puebla.	45
Cuadro 14.	Probabilidad de ocurrencia de la primera, última y período libre de heladas, de las estaciones climatológicas del estado de Tlaxcala.	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento horario de temperatura	4
Figura 2. Abrigo Meteorológico	6
Figura 3. Elementos que favorecen la inversión térmica (Matías, 2001).....	8
Figura 4. Elementos que integran la radiación solar (Matías, 2001).	9
Figura 5. Clasificación de heladas.....	10
Figura 6. Definición gráfica de la primer y última helada (Pájaro y Ortíz, 1989a).	16
Figura 7. Periodo libre de heladas (Pájaro y Ortíz, 1989a).	17
Figura 8. Ubicación de la zona considerada para el estudio	29
Figura 9. Estaciones climatológicas del lugar de estudio	30
Figura 10. Proceso de selección de una distribución teórica de probabilidad de ocurrencia.	34
Figura 11. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Normal en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla.	35
Figura 12. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Lognormal en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla.	35
Figura 13. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Exponencial en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla.	36
Figura 14. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Gamma en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla	36
Figura 15. Valor de $Z\alpha$ a una probabilidad del 80% (Ortiz, 2013).....	37
Figura 16. Tabla de la distribución normal	38
Figura 17. Algebra de mapas Sistema de Información Geográfica ArcMap v. 10.0	41
Figura 18. Clasificación de la zona de estudio para el Periodo Libre de Heladas	42
Figura 19. Clasificación de la zona de estudio para la primera decena del año	43
Figura 20. Clasificación de la zona de estudio para la segunda decena del año.....	43
Figura 21. Primera, última y periodo libre de heladas al 20%	48
Figura 22. Probabilidad del Periodo Libre de heladas al 20%.....	49
Figura 23. Probabilidad del Periodo Libre de heladas al 30%.....	50
Figura 24. Probabilidad de la Primera Helada al 20%	51

Figura 25. Probabilidad de la Última Helada al 20%.....	52
Figura 26. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa Cruz Coyotepec, Puebla.	53
Figura 27. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa María Techachalco, Puebla.	54

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo, las altas y bajas temperaturas extremas se encuentran en las regiones típicamente cálidas y frías, respectivamente; sin embargo, se pueden presentar también en climas templados, en las latitudes medias. En estas últimas, las temperaturas se consideran extremas cuando descienden sustancialmente de lo normal (Engelbert, 1997).

Los fenómenos extremos son los que mayor impacto producen en las sociedades y en la economía de los pueblos. Ellos están dentro de la variabilidad natural del sistema tierra-atmósfera, aunque la variabilidad del clima, y en particular en la escala interanual, está aumentando. Por consiguiente, es necesario profundizar en el conocimiento acerca de la variabilidad de los eventos extremos.

En el caso de la agricultura, las restricciones que el clima puede imponer a los sistemas productivos son diversas. Entre estas restricciones se puede mencionar la disponibilidad de agua durante el ciclo vegetativo de las plantas, y sobre todo durante las etapas críticas de desarrollo, lo que determina los volúmenes de cosecha y rendimiento de los cultivos. Otro tipo de restricción importante, aún bajo condiciones favorables de disponibilidad de agua, es la presencia de bajas o altas temperaturas, las cuales establecen condiciones de estrés por frío o por calor para la planta, incluso si se alcanzan las temperaturas letales, pueden ocasionarle daños irreversibles en partes de la planta o la muerte de la misma (Straschnoy *et al.*, 2006).

La resistencia a la helada varía mucho de unas plantas a otras. La temperatura crítica a la cual los diferentes órganos vegetales son perjudicados difiere según especies y variedades; los daños dependen también de la intensidad y duración de la helada y del nivel de disminución de la temperatura (Peralta, 1995).

Por lo tanto, la presencia de heladas constituye uno de los principales problemas o restricciones climáticas para el desarrollo y éxito de la horticultura y fruticultura en las regiones subtropicales y templadas de México y del mundo. En las regiones subtropicales y sobre todo en las regiones templadas, existe una temporada de invierno definida que año con año aporta días con bajas temperaturas, que pueden constituir heladas que dañan a los cultivos, dependiendo de la especie y su etapa de desarrollo (Monterubbianesi y Cendoya, 2001). Una estrategia inteligente para el manejo de esta problemática es la caracterización regional del fenómeno de las heladas y de los niveles de tolerancia al frío de los cultivos de interés.

Para evaluar las disponibilidades y limitantes climáticas de una región determinada es imprescindible caracterizar en términos cuantitativos el comportamiento de diversos elementos del clima, tales como temperatura, precipitación pluvial, humedad ambiental, evaporación, radiación solar, viento y otros (Villalpando *et al.*, 1991). Dicha caracterización se logra eficazmente, siempre y cuando se disponga de datos climatológicos representativos y confiables (Castro y Arteaga, 1993).

Por tal motivo es fundamental reconocer que, para disminuir los desastres, es indispensable evaluar y luego disminuir la condición de riesgo que los provoca. Es allí precisamente en donde las nuevas tecnologías asociadas a la integración de información geográfica y geoespacial cobran una gran importancia (Roberto Quaas Weppen, 2009).

Las heladas es uno de los fenómenos ambientales que más daño causan a la vida animal y vegetal de muchas regiones del mundo. Los estragos que ocasionan podría minimizarse si se conocieran a fondo las características de su distribución, formación y evolución, para así poder desarrollar mejores estrategias y técnicas de defensa en la lucha contra esta adversidad. Por esto, a nivel nacional o regional se justifica cualquier tentativa por esclarecer aspectos relacionados con este fenómeno (Grassi, 1983).

De esta forma, las heladas son fenómenos meteorológicos capaces de afectar el rendimiento, la supervivencia y la calidad de los cultivos, siendo este fenómeno uno de

los mayores riesgos asociados a la producción agropecuaria. Es por ello que la información climática podría considerarse como un elemento clave para la toma de decisiones.

Por esto resulta de fundamental importancia el conocimiento de la frecuencia, estacionalidad, intensidad y origen o génesis de las heladas, debido a que se carece de esta información en la zona de estudio. Esto permite implementar métodos de prevención de sus daños, a través de la incorporación de cultivares mejor adaptados a las condiciones climáticas locales, como así también la aplicación de estrategias de manejo, que determinen una correcta planificación de las fechas de siembra, tanto de los cultivos característicos de la zona, como de otros que pudieran ser introducidos en esta.

La cuantificación del riesgo de heladas en el estado de Tlaxcala y Puebla, es hasta el momento poco disponible e incompleto, de aquí surge la necesidad de contar con estadísticas climatológicas actualizadas para apoyar las áreas de investigación, planeación y desarrollo agrícola, pecuario y forestal.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Por medio de datos meteorológicos, determinar la probabilidad de ocurrencias de heladas con métodos estadísticos para el estado de Tlaxcala y Puebla.

2.2. Objetivos particulares

- Caracterizar de una manera precisa el fenómeno de las heladas en la región de Tlaxcala y Puebla.

- Para cada una de las estaciones meteorológicas presentar información sobre probabilidad de la primera y última helada y el período libre de heladas con diferente probabilidad de ocurrencia.
- A partir de los datos estadísticos, obtener mapas de probabilidad y ocurrencias de heladas mediante técnicas cartográficas de SIG.

III. HIPÓTESIS

Con base en la información de registro de 30 años o más de temperatura, es posible generar uno o más modelos estadísticos y mapas de probabilidad de ocurrencia de heladas y de los correspondientes daños en los diferentes cultivos.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Definición de heladas

Existen varias definiciones de una helada, se puede decir que una helada ocurre cuando la temperatura del aire cercano a la superficie del terreno disminuye a 0 °C o menos, durante un tiempo mayor a cuatro horas (Matias *et al.*, 2001). Generalmente la helada se presenta en la madrugada o poco antes de la salida del Sol (Figura 1).

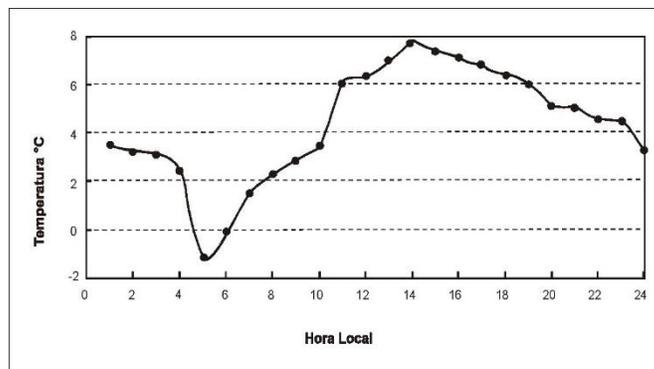


Figura 1. Comportamiento horario de temperatura

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Blanc *et al.*, 1963; Bettencourt, 1980; Mota, 1981; Cunha, 1982); no obstante, la palabra es ampliamente utilizada por el público para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación. Los agricultores a menudo utilizan los términos “helada” y “congelación” de forma indistinta, con la definición vaga de “una temperatura del aire inferior o igual a 0 °C”.

El concepto meteorológico de helada considera como tal a todo descenso de temperatura del aire igual o menor a 0 °C. Cuando no se realiza ninguna aclaración, debe entenderse que dicha temperatura se ha registrado en un termómetro en abrigo meteorológico a la altura normal de observación. En México, según las normas del Servicio Meteorológico Nacional, la altura del refugio meteorológico es a 1.50 m sobre el suelo. Se suele hablar, también, de helada de superficie o helada césped, refiriéndose a temperaturas registradas en termómetros colocados sobre el suelo o a escasa distancia del mismo (Martínez, 2005).

Sin embargo, para los fines generales y prácticos, las temperaturas de 0 °C o inferiores, obtenidas en el refugio meteorológico a 1.50 m de altura, resultan adecuadas para establecer comparaciones de carácter agrícola (Figura 2). Debe recordarse que, en virtud de la inversión térmica nocturna, pueden ocurrir heladas a nivel del suelo o en cultivos de poca altura aunque no se registren en el abrigo meteorológico.



Figura 2. Abrigo Meteorológico

Por otra parte, teniendo en cuenta el criterio agrometeorológico, se considera que se produce una helada cuando la temperatura ha disminuido lo suficiente, al punto tal de producir daños en los órganos vegetales (Villaseca *et al.*, 1992).

Se denominará “helada” en fruticultura al evento climático en el cual la temperatura ambiental que rodea al vegetal o a un órgano vegetal aéreo, está bajo los rangos que no permiten la actividad normal de la planta.

Comúnmente una helada está asociada al concepto de temperatura ambiental inferior a 0 °C. Ya que es, a esta temperatura en la cual el metabolismo de un vegetal comienza a hacerse más lento y por otra parte es la temperatura a la cual comienza el agua en estado líquido a cambiar a su estado sólido.

Por otra parte, el concepto de helada está íntimamente relacionado al de congelación, ya que a temperaturas inferiores a los 0 °C cualquier tejido u órgano vegetal comienza a congelarse. En todo proceso de congelación el agua está directamente relacionada.

Un estudio agrícola de las heladas debe determinar su régimen en función de los valores medios, extremos y de variabilidad de: duración, intensidad, época de ocurrencia, frecuencia y peligrosidad.

Asimismo, debe integrar no sólo los parámetros antes mencionados, sino también aquellos índices que permitan cuantificar, o al menos calificar, el probable daño a los distintos cultivos agrícolas.

4.2. Elementos meteorológicos que afectan la formación de heladas

El estado de la atmósfera se manifiesta a través de elementos del tiempo, como son la temperatura, la precipitación, la humedad, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la nubosidad y la radiación solar, los cuales presentan una variación espacial y temporal. Sin embargo, los principales elementos del tiempo que influyen en la formación de las heladas son el viento, la nubosidad, la humedad atmosférica y la radiación solar (Matías *et al.*, 2001).

4.2.1. Viento

El viento es fundamental para que se desarrolle una helada, pues cuando hay corrientes de aire se mezcla el aire frío, que se encuentra cercano al suelo, con el más caliente que está en niveles superiores, lo que hace más difícil el desarrollo de una helada. Por tanto, una de las condiciones que favorece la ocurrencia de heladas es la ausencia de viento.

La temperatura del aire disminuye conforme aumenta su distancia a la superficie del suelo. Sin embargo, existe una inversión térmica cuando la temperatura es mayor conforme aumenta la elevación. Cuando se presenta una inversión térmica, las capas de aire son arrastradas por otras descendentes y más frías. Este fenómeno se manifiesta en los valles, principalmente en invierno y está asociado con los cielos despejados y temperaturas bajas cercanas a la superficie del suelo (Figura 3).



Figura 3. Elementos que favorecen la inversión térmica (Matías, 2001).

4.2.2. Nubosidad

Las nubes son extensos conjuntos de pequeñas gotas de agua y cristales de hielo suspendidos en el aire. Cuando el cielo está cubierto por nubes, éstas disminuyen la pérdida de calor del suelo por radiación hacia la atmósfera y devuelven parte de ese calor a la Tierra, evitando con esto la helada (Medina, *et al.*, 2008).

4.2.3. Humedad atmosférica

Cuando disminuye la temperatura a los 0° C o menos, y el viento es escaso, el vapor de agua contenido en el aire, se condensa; si la humedad es abundante, ésta produce niebla y cuando tiene poco contenido de humedad, se forma la helada. Por ello una gran humedad atmosférica reduce la probabilidad de ocurrencia de heladas.

4.2.4. Radiación solar

La fuente principal de la energía que recibe la atmósfera terrestre es el Sol y continuamente radia parte de esta al espacio en forma de onda larga.

Una cantidad de radiación solar es absorbida por la superficie de la Tierra y otra es devuelta desde su superficie a la atmósfera (radiación reflejada). Durante el día, el suelo retiene el calor y durante la noche lo pierde; estos procesos dependen de la nubosidad y del viento que existan sobre ciertas regiones del planeta (Figura. 4).

Cuando los días son más cortos y las noches más largas, aumenta la ocurrencia de heladas, por ello existe menor acumulación de calor en el suelo y ésta habrá de regresar a la atmósfera en mayor tiempo.



Figura 4. Elementos que integran la radiación solar (Matías, 2001).

4.3. Clasificación de las heladas

La clasificación de las heladas se realiza bajo diferentes criterios: de acuerdo a su época de ocurrencia, por el proceso físico que les da origen, y por los efectos visuales que causan sobre los cultivos (Norero, 1991), (Figura 5).

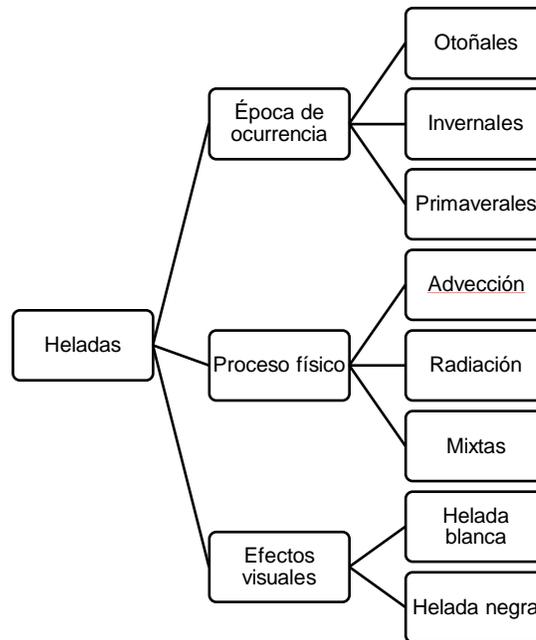


Figura 5. Clasificación de heladas

4.3.1. Época de ocurrencia

4.3.1.1. Heladas otoñales

Son las primeras heladas de la temporada de invierno y ocurren normalmente durante el otoño.

4.3.1.2. Invernales

Ocurren en plena temporada de invierno. Son las que menor daño provocan, dado que en esa época la mayoría de las plantas se encuentran en reposo y por lo tanto en condiciones de soportar bajas temperaturas.

4.3.1.3. Heladas primaverales

Son las últimas heladas de la temporada fría y ocurren normalmente durante la primavera.

4.3.2. Proceso físico

4.3.2.1. Heladas de advección

Son provocadas por un vuelco de aire frío. Este tipo de helada se caracteriza por la presencia de vientos fríos con velocidades iguales o superiores a 15 km/hora y la variación de la temperatura con la altura es negativo, sin inversión térmica.

4.3.2.2. Heladas de radiación

Este tipo de heladas se caracteriza por gran pérdida de calor del suelo durante la noche, favorecida por el escaso o nulo viento y por un cielo sin nubosidad, que provoca un fuerte enfriamiento de suelo y de las capas de aire en contacto con él. La helada radiativa es precedida por la ocurrencia de inversión térmica, por lo que la temperatura es más baja en la zona cercana a la superficie terrestre y aumenta con la altura. La inversión térmica se forma una vez que se rompe el ciclo convectivo del aire, debido al enfriamiento del suelo.

4.3.2.3. Heladas mixtas

Se denominan de este modo cuando además del vuelco de aire frío, existe simultáneamente un enfriamiento por pérdida de calor del suelo.

4.3.3. Efectos visuales

4.3.3.1. Helada blanca

Ocurre cuando se forma hielo sobre la superficie de las plantas y objetos expuestos libremente a la radiación nocturna. La temperatura es menor o igual a 0 °C.

4.3.3.2. Helada negra

La helada negra ocurre cuando el descenso de la temperatura por debajo de 0 °C no va acompañado de formación de hielo por la escasa humedad relativa en el ambiente. Su designación responde a la visualización de la coloración negruzca que adquieren al día siguiente algunos órganos vegetales, debido a la destrucción causada por el frío.

4.4. Daños por heladas

Los daños por heladas ocurren cuando la temperatura del aire alcanza niveles próximos al punto de congelación del agua. El grado de daño ocasionado por la helada depende de la fase vegetativa en la que se encuentra el cultivo durante la ocurrencia del fenómeno (Cuadros 1 y 2), así como del tiempo de duración e intensidad de la misma (Torres, 1983; Romo y Arteaga, 1989).

En cultivos agrícolas se pueden establecer los siguientes grados de daños:

4.4.1. Primer grado

Muerte de algunos órganos vegetativos como hojas y tallos tiernos; perturbación de funciones en el resto de los órganos.

4.4.2. Segundo grado

Destrucción de gran porcentaje de las flores y partes vegetativas.

4.4.3. Tercer grado

Destrucción de frutos en formación, y deformación de los sobrevivientes.

4.4.4. Cuarto grado

Muerte de toda la planta

Cuadro 1 Temperatura de daño por heladas (°C) a frutales en diferentes etapas fenológicas de su desarrollo (Burgos, 1963).

FRUTAL	ETAPA FENOLOGICA		
	REPOSO	FLORACIÓN	FRUCTIFICACIÓN
Limonero	-5.6	-1.1	-1.1
Toronja	-7.8		
Naranja	-7.8		-2.0
Mandarina	-5.0		
Higuera	-9.4		
Datilero	-11.0		
Vid	-17.0	-0.6	-0.6
Durazno	-26.1	-2.8	-1.1
Chabacano	-26.1	-2.2	-0.6
Cerezo	-28.9	-2.2	-1.1
Peral	-28.9	-2.2	-1.1
Ciruelo	-34.4	-2.2	-1.1
Manzano	-34.4	-2.2	-1.1

Cuadro 2. Temperatura de daño por heladas (°C) a cultivos en diferentes etapas fenológicas de su desarrollo (Ventskevich, 1961).

CULTIVO	ETAPA FENOLÓGICA		
	GERMINACIÓN	FLORACIÓN	FRUCTIFICACIÓN
<i>Altamente resistentes</i>			
Avena	-8 a -9	-1 a -2	-2 a -4
Cebada	-7 a -8	-1 a -2	-2 a -4
Chincharo	-7 a -8	-2 a -3	-3 a -4
Cilantro	-8 a -10	-2 a -3	-3 a -4
Lentejas	-7 a -8	-2 a -3	-2 a -4
Trigo	-9 a -10	-1 a -2	-2 a -4
<i>Resistentes</i>			
Cáñamo	-5 a -7	-2 a -3	-2 a -4
Cártamo	-4 a -6	-2 a -3	-3 a -4
Frijol	-5 a -6	-2 a -3	-2 a -3
Girasol	-5 a -6	-2 a -3	-2 a -3
Lino	-5 a -7	-2 a -3	-2 a -4
Lupino	-6 a -8	-3 a -4	-3 a -4
Mostaza blanca	-4 a -6	-2 a -3	-3 a -4
Nabo	-6 a -7		
Remolacha azucarera	-6 a -7	-2 a -3	
Remolacha forrajera	-6 a -7		
Vicia de primavera	-6 a -7	-3 a -4	-2 a -4
Zanahoria	-6 a -7		
<i>Medianamente resistentes</i>			
Lupino amarillo europeo	-4 a -5	-2 a -3	
Mijo italiano	-3 a -4	-1 a -2	-2 a -3
Repollo	-5 a -7	-2 a -3	-6 a -9
Soja	-3 a -4	-2 a -3	-2 a -3
<i>Poco resistentes</i>			
Maíz	-2 a -3	-1 a -2	-2 a -3
Mijo	-2 a -3	-1 a -2	-2 a -3
Papa	-2 a -3	-1 a -2	-1 a -2
Sorgo	-2 a -3	-1 a -2	-2 a -3
Sorgo del Sudán	-2 a -3	-1 a -2	-2 a -3
<i>No resistentes</i>			
Ajonjolí	-0.5 a -1	-0.5 a -1	
Algodón	-1 a -2	-1 a -2	-2 a -3
Arroz	-0.5 a -1	-0.5 a -1	-0.5 a -1
Cacahuete	-0.5 a -1		
Melón	-0.5 a -1	-0.5 a -1	
Pepino	-0.5 a -1		
Ricino	-2 a -1.5	-0.5 a -1	
Tabaco	0 a -1	0 a -1	0 a -1
Tomate	0 a -1	0 a -1	0 a -1
Trigo sarraceno	-1 a -2	-1 a -2	-0.5 a -2

4.5. Gradiente térmico en altura

Durante la ocurrencia de una helada el aire más frío se acumula en las partes bajas, donde la temperatura es menor en la superficie terrestre y aumenta con la altura, proceso al que se le denomina inversión térmica. Villaseca *et al.* (1992) señalan que esta situación se produce cuando las pérdidas de calor que sufre la superficie del suelo y los vegetales son superiores a los aportes que éstos reciben del aire o capas profundas del suelo. La situación normal ocurre durante el día, donde la cubierta vegetal recibe radiación del sol y también de la atmósfera. Los vegetales y el suelo almacenan parte de esta energía elevando su temperatura, de manera que ésta baja a medida que se aumenta en altura.

Los datos sobre las heladas, usando el nivel térmico de 0 °C y observaciones a nivel del cobertizo meteorológico, se pueden relacionar en una forma relativamente directa con cultivos de porte alto, como frutales, pero no ocurre lo mismo con los de baja estatura como trigo, pastos, porotos, hortalizas, etc. Además, la temperatura de cero grado no es una temperatura instantáneamente letal para todas las especies vegetales; ésta en realidad varía de una a otra, y aun dentro de una misma especie, según sea la etapa fenológica en que se encuentre (Norero, 1991).

4.6. Primera y última helada

Las heladas en México se concentran alrededor del invierno, de tal forma que es posible representar su distribución como una curva normal donde el punto más alto se ubica hacia fines de un año o principios del siguiente. Bajo este esquema resulta fácil entender lo que significa la primera y la última helada. Sin embargo, los cultivos anuales se desarrollan entre dos grupos de heladas y esto en ocasiones genera confusión en su denominación. Si un año lo dividimos en semestres, uno del 1o. de enero al 30 de junio y otro del 1o. de julio al 31 de diciembre, entonces como lo menciona (Grassi, 1983) la última helada del primer grupo se presentará en el primer semestre y la primera helada del segundo grupo en el segundo semestre.

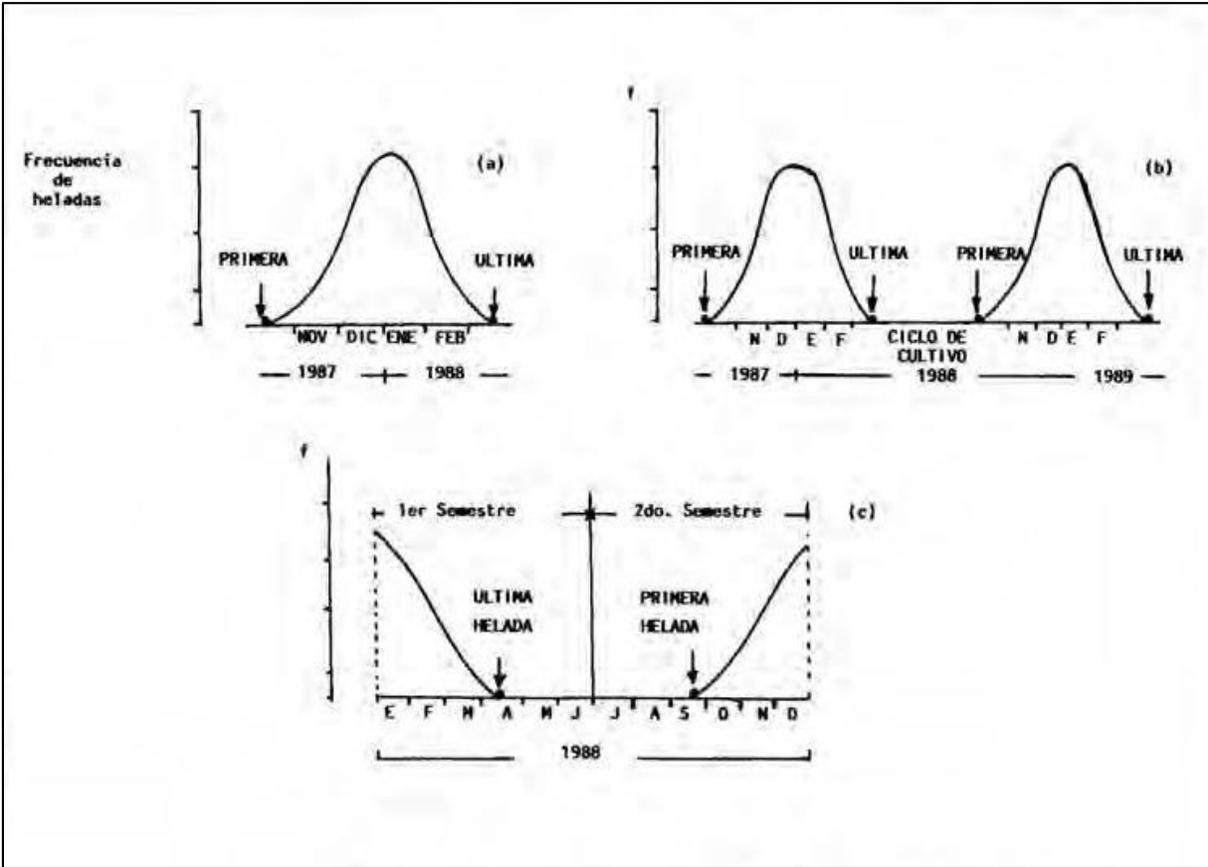


Figura 6. Definición gráfica de la primer y última helada (Pájaro y Ortíz, 1989a).

4.7. Periodo libre de heladas

El período libre de heladas se define como el tiempo durante el cual no existen limitaciones de temperaturas, esencialmente de aquellas que alcanzan a atrofiar las actividades celulares de una planta por efecto de bajas temperaturas, que pueden ser de cero grados Celsius o menos (Maciel *et al.*, 1994).

Torres (1995) lo define como el tiempo que transcurre desde que se presentó la última helada de un periodo hasta la primera helada del periodo siguiente.

Sin embargo, Day (1911) citado por Grassi (1983), utiliza el término "Estación de crecimiento", para definir el número de días entre la última helada que mata a las plantas

en primavera y la primera helada que mata a las plantas en otoño. Mientras que Reed (1911), también citado por Grassi (1983), considera a la componente de probabilidad de ocurrencia de la última y primera helada, definiendo a la "probable estación de crecimiento" como el periodo comprendido entre la fecha con razonable seguridad en primavera y la fecha con razonable seguridad en otoño con condiciones óptimas de temperatura para el desarrollo de algunas plantas.

Grassi (1983). define al periodo libre de heladas (PLH), como el número de días comprendido entre la fecha después de la cual es esperada una última helada con una probabilidad máxima aceptada para un cultivo y la fecha antes de la cual es esperada una primer helada con probabilidad máxima aceptada para el mismo cultivo. En este punto resaltan dos aspectos importantes, que el PLH puede establecerse con base en datos medios de ocurrencia de las últimas y primeras heladas, o con valores probabilísticos para estos mismos eventos, como se ilustra en la figura 7.

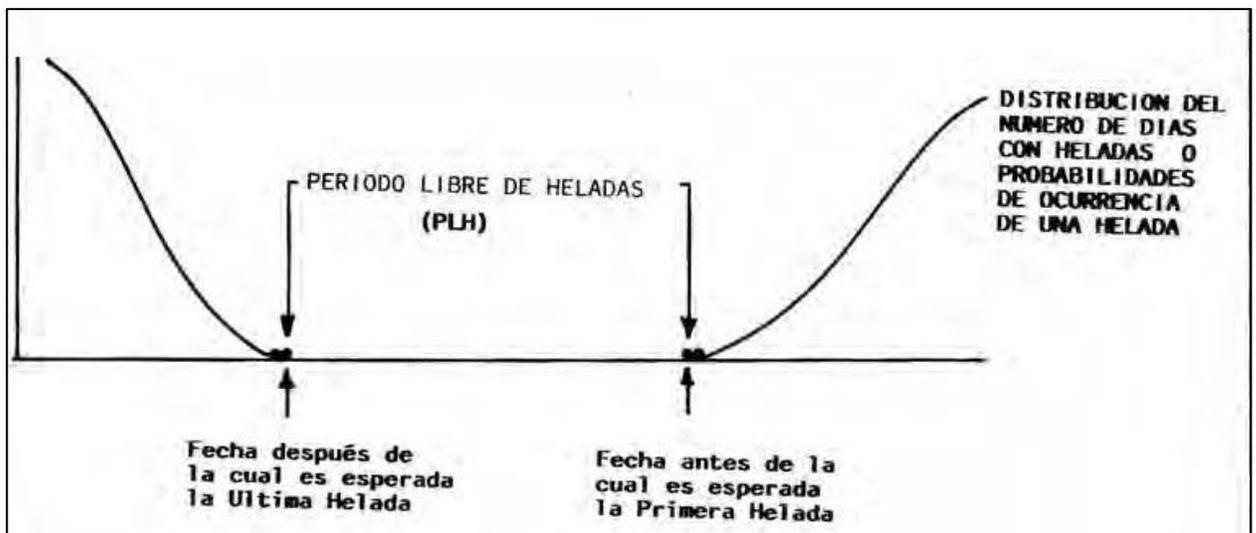


Figura 7. Periodo libre de heladas (Pájaro y Ortíz, 1989a).

4.8. Parámetros agrícolas para la determinación de heladas

Existen muchos aspectos de información ambiental que deben ser trabajados a mayor detalle, tal es el caso de los parámetros agroclimáticos (Serrano *et al.*, 2007), los cuales generalmente están estrechamente vinculados a la productividad de los sistemas agrícolas. En el caso específico del tema de las heladas que aborda la presente publicación, existen pocos estudios tanto a escala nacional como estatal, a continuación se citan algunos de ellos.

Pájaro y Ortiz (1989a) proponen ecuaciones de regresión cuadrática para estimar el período libre de heladas a escala nacional y a través de la temperatura mínima media anual y temperatura media anual. Con base en este estudio, estos mismos autores estiman la estación de crecimiento en función de la disponibilidad de agua y el período libre de heladas (Pájaro y Ortiz, 1989b).

Villalpando y García (1993) determinan las fechas de primera y última helada y el período libre de heladas, con base en estimaciones probabilísticas y con expresión cartográfica para el estado de Jalisco.

Ruiz *et al.* (2003b) y Anguiano *et al.* (2003) desarrollaron modelos regionales para estimar la duración del período libre de heladas y las fechas de ocurrencia de la primera y última helada con base en determinaciones probabilísticas de heladas.

Para conocer la probabilidad de ocurrencia de helada se puede utilizar la distribución de probabilidad normal o Gaussiana $F = (x, : \mu, \sigma)$ Ecuación 1, la cual se aplica a variables continuas que se distribuyen normalmente, su expresión matemática es la siguiente (Montgomery y Runger, 1996):

$$F = (x, : \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dx \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde; x es la variable en estudio, m y s son la media y la desviación estándar de la población, respectivamente. Hoy día, no se conoce analíticamente la integral de la ecuación 1, por lo que es necesario recurrir a los métodos numéricos para evaluarla (Aparicio, 2005). Sin embargo, para hacer esto se requeriría una tabla para cada valor de m y s , por lo que se ha definido la variable estandarizada, que está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar uno.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta variable es función de los niveles de probabilidad asignado. Así, la función de distribución de probabilidad (Ecuación. 1) se puede escribir como;

$$F(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z)^2}{2}\right] dz \quad (\text{Ec. 3})$$

La función $F(Z)$ se ha calculado numéricamente y se han publicado tablas de ella en muchos libros de estadística (Little y Hills, 1976). Para aplicar la Ecuación 3, las variables m y s se pueden estimar como la media \bar{X} , y desviación estándar, S , de la muestra de datos (Aparicio, 2005). Las cuales se estiman con la Ecuación 4.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde; X_i es la observación i -ésima, n es el número total de observaciones.

V. MARCO DE REFERENCIA

5.1. Ubicación

Los estados de Tlaxcala y Puebla están ubicados en los paralelos 18° Norte y 20° 35´ Norte, y entre los meridianos de 97° Oeste y 99° Oeste, cubren una superficie de 37,833 kilómetros cuadrados. Sistemas montañosos muy importantes hacen notable la morfología y la variabilidad climática de esta región, que es una de las más densamente pobladas del territorio nacional.

5.2. Clima

La altitud en la región es variable, se encuentran lugares que van de 500 a más de 4000 metros sobre el nivel del mar. Esto hace que se presente una gran variedad de climas, en la parte Norte de la región el clima es templado y húmedo, en la parte Central y en las proximidades de la Sierra Nevada es frío y en la parte Sur es cálido.

5.3. Temperatura

La temperatura media anual en el estado de Puebla es de 18.4 °C., la media anual máxima es de 22.3 °C., y la media anual mínima es de 14.50 °C. La temperatura máxima registrada ha sido de 49 °C y la mínima de -9.5 °C. En ambos estados, el número de días con heladas al año es variable, en el Norte y Sur de la región es de menos de 10 días, y en la región de los volcanes pasa de los 60 días. Las heladas se presentan, en su mayoría entre los meses de Octubre y Marzo.

5.4. precipitación

La precipitación media anual oscila entre los 400 milímetros y más de 3000 milímetros al año (Grassi, 1983).

5.5. Agricultura

Ahí se desarrollan gran parte de los cultivos básicos para la alimentación como maíz, frijol, trigo, cebada, avena y haba, de los Valles Altos. En esas áreas las heladas limitan el periodo apto para el crecimiento de los cultivos, con un riesgo considerable para su producción.

En los estados de Tlaxcala y Puebla, el sector agrícola resalta por su importancia en la producción de alimentos tales como: maíz. Frijol, trigo, cebada, haba y papa. Los alimentos básicos como el maíz y el frijol, representan la mayor parte de la superficie cosechada y en la mayoría de los casos estos cultivos son de autoconsumo en el medio rural.

En los Valles Altos estos cultivos se siembran desde zonas de riego o buen temporal hasta aquellas zonas donde las heladas tardías o tempranas así como el mal temporal hacen bastante arriesgada la producción de grano. Las heladas limitan el ciclo disponible para el cultivo, por esta razón, es necesario elegir la variedad que mejor se adapte a cada condición de siembra y según las recomendaciones de fertilización y labores de cultivo, para lograr una buena producción, SARH (1981).

En México, el cultivo del maíz ha sido y será uno de los elementos básicos de la alimentación, y el de mayor importancia por la superficie sembrada (SARH, 1982). Sin embargo en el estado de Tlaxcala, dicho cultivo cubre dos terceras partes de la superficie total cultivable. Por lo tanto para condiciones de temporal se recomiendan las nuevas variedades mejoradas: Huamantla, Tlaxcala, Cuapixtla y VS-22, las cuales manifiestan amplia adaptación y buen rendimientos en las áreas maiceras de la entidad, también puede sembrarse el híbrido H-30. En los Cuadros 3 y 4 se ilustran los días a madurez, la época de siembra de estas variedades, así como la zona de adaptación (Grassi, 1983).

Cuadro 3. Variedades de maíz adaptadas a la región de los Valles Altos. CAETECA, CIAMEC, 1981.

VARIEDAD	REGIÓN	DÍAS A MADUREZ	CICLO VEGETATIVO	FECHA LÍMITE DE SIEMBRA
H-30	El Seco Soltepec Cd. Cerdán	175	Tardío	15 de Abril
Blanco los Llanos V-27	Cd. Cerdán	165	Intermedio	30 de Abril
San Juan V-29	San Juan Atenco Tlalchichuca	170	Intermedio	30 de Abril
VS-22	Cd. Cerdán Tlalchichuca El Seco	175	Tardío	15 de Abril
Victoria V-31	San Juan Atenco Gpe. Victoria Tepeyahualco	155	Precoz	15 de Mayo

V= Variedad de polinización libre (criollo mejorado)

H= Híbrido. La semilla debe renovarse por lo menos cada año

VS= Variedad Sintética. La semilla conserva sus características por lo menos durante cinco años

Cuadro 4. Principales características de las variedades de maíz y época de siembra para condiciones de temporal. CAEVAMEZ, CIAMEC, INTA, 1981.

VARIEDAD	REGIÓN	DÍAS A MADUREZ	ÉPOCA DE SIEMBRA
H-30		150	Abril - Mayo
VS-22		160	Abril - Mayo
Huamantla	Sur de Tlaxcala y Nativitas	140	Abril - Mayo
Tlaxcala		130	Abril - Mayo
H-30		175	15 de Marzo - 15 de Abril
VS-22	Valle de Huamantla y Faldas de la Malinche	180	15 de Marzo - 15 de Abril
Huamantla		165	Abril
Tlaxcala		160	Abril
Cuapiaxtla		150	Abril - 10 de Mayo
Huamantla	Valle de Calpulalpan	165	Abril
Tlaxcala		160	Abril
Cuapiaxtla		150	Abril - 10 de Mayo
H-30	Tlaxcala y Apan	170	15 de Marzo - 15 de Abril

El frijol *Phaseolus vulgaris* L. es un producto básico en la alimentación del pueblo mexicano.

La fecha adecuada de siembra para las variedades de guía o semiguía es del 15 de abril al 31 de mayo, las siembras realizadas después de este periodo pueden ser afectadas por heladas tempranas. Las variedades de mata cuyo ciclo es más corto, pueden ser sembradas hasta el 30 de junio.

El trigo ocupa el tercer lugar en cuanto a superficie sembrada y el segundo en volumen de producción, entre los cultivos básicos, este cereal es consumido por la población en forma de pan y de otros derivados.

Actualmente el 96% de la producción triguera nacional se obtiene en siembras de invierno, bajo condiciones de riego, en las regiones del Noroeste, Norte y el Bajío, y sólo el 4% restante en siembras de verano en áreas de temporal, SARH (1981). Algunas características agronómicas del trigo se pueden ver para dicha región en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Principales características agronómicas de las variedades de trigo aptas para su siembra en los Valles Altos de México. CAEVAMEX, 1981.

VARIEDAD	DÍAS A FLORACIÓN	DÍAS A MADUREZ
Zacatecas VT-74	65 a 70	125
Cleopatra VS-74	65 a 70	125
Tesopaco S-76	65 a 70	125
Anáhuac F-75	70 a 75	125
Pavón F-76	75 a 80	125

La mejor época de siembra es cuando se inician las lluvias. Si éstas se retrasan demasiado al elegir variedades para la siembra deberá considerarse su ciclo vegetativo, a fin de evitar que el cultivo sea dañado por heladas. En las regiones de Huamantla, Apizaco, Españita y Nanacamilpa en Tlaxcala, puede sembrarse del 15 de mayo al 10 de junio. En las regiones de Libres, Oriental y Cuyoaco en Puebla, puede sembrarse del 10 de abril al 20 de mayo, y en el área de San Marcos la siembra puede hacerse del día primero al 20 de mayo.

La principal zona productora de la cebada está situada en la región de los Valles Altos donde se cultivaron más de 200,000 hectáreas bajo condiciones de temporal. En el Cuadro 6, se describen algunas características sobre dicho cultivo que posee un ciclo vegetativo más corto que el de los cultivos tradicionales en la región, y que generalmente es sembrado cuando se establece la época de lluvias escapando de las heladas tardías, pero con el riesgo de ser afectadas por heladas tempranas, INIA, (1981).

Cuadro 6. Variedades de cebada para grano recomendada para el estado de Puebla. CAETECA, CIAMEC, INIA, SARH 1981.

VARIEDAD	DÍAS A FLORACIÓN	DÍAS A MADUREZ	FECHA DE SIEMBRA
Centinela	52	103	20 de abril al 20 de junio
Puebla	55	105	20 de abril al 20 de junio
Cerro Prieto	58	110	20 de abril al 10 de junio
Apizaco	61	115	20 de abril al 10 de junio

Para el estado de Tlaxcala también se recomienda la siembra de estas mismas variedades en los meses de abril y mayo.

Sin embargo, datos del SIAP de 1980 a 2008 resumen los principales cultivos de temporal y de riego para los estados de Tlaxcala y Puebla, así como se puede ver en los Cuadros 7 Y 8.

Cuadro 7. Principales cultivos en el Estado de Puebla

CULTIVOS DE RIEGO			
Maíz Grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	48,195.1	41,136.0	45,878.8
Rendimiento (ton / ha)	4.3	4.6	4.4
Maíz Forrajero	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	3,144.0	3,734.0	3,312.9
Rendimiento (ton / ha)	39.1	44.1	40.9
Zanahoria	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	2,588.0	2,511.0	2,485.2
Rendimiento (ton / ha)	25.8	26.4	27.0
Cebolla	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	3,608.0	3,637.0	3,447.0
Rendimiento (ton / ha)	16.9	17.0	17.1
CULTIVOS DE TEMPORAL			
Maíz grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	462,374.4	509,373.0	502,277.9
Rendimiento (ton / ha)	1.6	1.6	1.6
Cebada grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	23,406.8	31,519.0	30,442.2
Rendimiento (ton / ha)	1.9	2.5	2.2
Sorgo grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	15,135.0	16,737.0	11,262.6
Rendimiento (ton / ha)	4.4	3.5	3.2
Frijol	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	61,807.5	53,349.0	49,496.5
Rendimiento (ton / ha)	0.6	0.7	0.6

^a Cifras preliminares SIAP

* Estimado DGEAP-SFA con datos SIAP de 1980 a 2008

Cuadro 8. Principales cultivos en el Estado de Tlaxcala

CULTIVOS DE RIEGO			
Maíz Grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	16,922.8	16,862.0	16,944.6
Rendimiento (ton / ha)	3.1	3.6	3.6
Maíz Forrajero	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	796.0	796.0	819.2
Rendimiento (ton / ha)	40.2	44.9	48.4
Papa	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	428.0	428.0	451.2
Rendimiento (ton / ha)	37.9	38.4	38.0
Tomate Verde	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	611.0	621.0	597.2
Rendimiento (ton / ha)	14.4	16.3	15.2
Frijol	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	1,079.3	1,079.0	1,080.7
Rendimiento (ton / ha)	1.3	1.5	1.5
CULTIVOS DE TEMPORAL			
Maíz Grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	107,493.5	97,524.0	102,379.8
Rendimiento (ton / ha)	2.2	2.6	2.4
Maíz Forrajero	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	8,238.0	8,234.0	8,324.0
Rendimiento (ton / ha)	33.1	38.8	37.5
Trigo grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	42,608.0	45,453.0	44,077.0
Rendimiento (ton / ha)	2.5	2.7	2.8
Cebada Grano	2007	2008^a	2009*
Superficie Cosechada (ha)	34,850.5	38,237.0	38,394.6
Rendimiento (ton / ha)	2.4	2.4	2.5

^a Cifras preliminares SIAP

* Estimado DGEAP-SFA con datos SIAP de 1980 a 2008

En el Cuadro 9 se describe el ciclo vegetativo de los cultivos predominantes en el estado de Puebla y Tlaxcala (Ruiz *et al.*, 1999).

Cuadro 9. Ciclo vegetativo de los cultivos predominantes en los estados de Tlaxcala y Puebla

CULTIVO	CICLO VEGETATIVO (Días)
MÁIZ	100 - 180
TRIGO	180 - 250 (Invierno)
CEBADA	100 - 130
AVENA	100 - 130
PAPA	120 - 150
FRIJOL	90 - 120
HABA	90 - 220
LECHUGA	40 - 60 (Después del trasplante)
COL	100 - 150
CEBOLLA	100 - 140
ZANAHORIA	80 - 120
SORGO	90 - 150
TOMATE VERDE	90 - 140 (En campo)

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Zona de estudio

El estudio comprende la región centro del estado de Puebla y todo el estado de Tlaxcala. Los estados están ubicados en los paralelos 18° 45´ Norte y 19° 45´ Norte, y entre los meridianos de 97°15´ Oeste y 98°45´ Oeste. En esta área, es más común la presentación de heladas y donde más daño causa a la agricultura en el estado.

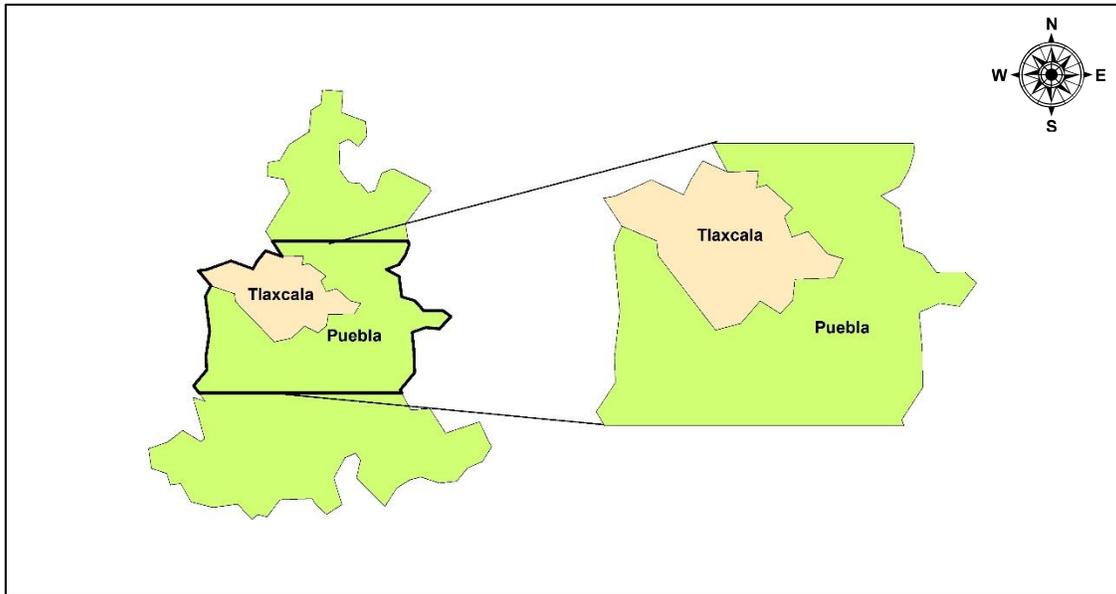


Figura 8. Ubicación de la zona considerada para el estudio

6.2. Información climatológica

De la información de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional se utilizarán datos de temperatura mínima diaria de 51 estaciones meteorológicas (Cuadros 10 y 11), para un período entre 20 y 30 años de acuerdo a la disponibilidad de información en cada estación (Figura 9). Se incluyen estaciones fuera del área de estudio en municipios circunvecinos a los de la región cuya información se incluirá en el proceso de interpolación para la generación de nueva información.

Cuadro 10. Estaciones climatológicas utilizadas en el Estado de Puebla

CLAVE	ESTACIÓN	LONGITUD_X	LATITUD_Y	ALTITUD (msnm)	ESTADO	PERIODO (años)
21007	AHUATEPEC	-97.919700	18.869400	2023	PUEBLA	1962-2013
21016	BALCN DIABLO A.TEXALUCA	-98.132200	18.897500	2105	PUEBLA	1962-2013
21020	MORELOS CAÑADA	-97.426944	18.760278	2360	PUEBLA	1968-1984
21021	CAPULUAQUE	-97.767222	19.783889	2329	PUEBLA	1977-2009
21027	CD. SERDAN (DGE)	-97.457778	18.944444	2563	PUEBLA	1969-1987
21040	GUADALUPE BUENAVISTA	-97.355800	19.370300	2357	PUEBLA	1961-1970
21047	IXTACAMAXTITLAN (CFE)	-97.814167	19.622778	2098	PUEBLA	1955-2004
21060	PALMAR DE BRAVO	-97.547200	18.836900	2191	PUEBLA	1970-2013
21077	SAN LUIS ATEXCAC	-97.456111	19.346389	2412	PUEBLA	1980-2008
21078	S.M.TEXMELUCAN LABASTIDA	-98.433900	19.298600	2262	PUEBLA	1962-2013
21079	SAN PEDRO TEMAMANTLA	-97.516667	18.933333	2429	PUEBLA	1969-2009
21080	SAN SALVADOR EL SECO (DGE)	-97.662500	19.133611	2345	PUEBLA	1966-2013
21081	SANTA CRUZ COYOTEPEC	-97.566944	19.023333	2415	PUEBLA	1966-2009
21082	TECAMACHALCO	-97.728100	18.898300	2227	PUEBLA	1984-2009
21096	SANTA RITA TLAHUAPAN	-98.581389	19.346389	2610	PUEBLA	1945-2009
21117	GUADALUPE VICTORIA	-97.350000	19.283333	2448	PUEBLA	1969-2009
21119	LIBRES (SMN)	-97.758056	19.500278	2900	PUEBLA	1938-2002
21123	HUAQUECHULA	-98.540833	18.778611	1580	PUEBLA	1945-2009
21129	FRANCISCO I. MADERO	-97.501111	19.614722	2578	PUEBLA	1984-2009
21136	ACAJETE	-97.956100	19.112500	2470	PUEBLA	1945-2013
21145	GUADALUPE VICTORIA	-97.300000	19.200000	3268	PUEBLA	1977-1988
21148	SAN MIGUEL CANOA	-98.077800	19.132200	2578	PUEBLA	1978-2013
21154	STA. CATARINA LOS REYES	-97.435300	18.880800	2406	PUEBLA	1979-2009
21159	ESPERANZA	-97.375600	18.859200	2444	PUEBLA	1979-1992
21163	EL BATAN	-98.177778	18.979722	2101	PUEBLA	1978-2000
21173	SANTA MA. TECHACHALCO	-97.466667	18.839722	2356	PUEBLA	1981-1994
21192	HUILANGO E-2	-98.595000	18.858056	2047	PUEBLA	1982-2009
21207	ZARAGOZA	-97.552800	19.786100	2269	PUEBLA	1983-2013
21209	LOS HUMEROS (CFE)	-97.406111	19.679167	2859	PUEBLA	1984-2009
21214	SAN JUAN TETLA 7 NORTE	-98.580600	19.173900	3386	PUEBLA	1982-1994

Cuadro 11. Estaciones climatológicas utilizadas en el Estado de Tlaxcala

CLAVE	ESTACIÓN	LONGITUD_X	LATITUD_Y	ALTITUD (m.s.n.m.)	ESTADO	PERIODO (años)
29002	APIZACO	-98.150000	19.416667	2418	TLAXCALA	1928-1997
29003	ATLANGA SAN JOSE	-98.216667	19.550000	2516	TLAXCALA	1961-1975
29004	CUAMANTZINGO	-98.269200	19.519700	2562	TLAXCALA	1969-2010
29005	CUAPIAXTLA	-97.766667	19.316667	2443	TLAXCALA	1963-2005
29007	EL CARMEN	-97.647200	19.316667	2350	TLAXCALA	1966-2005
29008	ESTOYITO	-98.633333	19.566667	2715	TLAXCALA	1967-1976
29010	HUEYOTLIPAN	-98.345300	19.471900	2602	TLAXCALA	1962-2010
29011	HUAMANTLA	-97.933333	19.316667	2517	TLAXCALA	1945-1957
29014	LIMITES	-98.550000	19.533333	2679	TLAXCALA	1967-1977
29019	SAN ANTONIO CALPULALAPAN	-98.568100	19.554700	2654	TLAXCALA	1974-2015
29024	SANCTORUM	-98.471900	19.492500	2742	TLAXCALA	1978-2008
29026	ZITLALTEPEC	-97.916667	19.200000	2589	TLAXCALA	1980-1993
29027	TOCATLAN	-98.033333	19.388600	2557	TLAXCALA	1986-2004
29032	TLAXCO	-98.125600	19.592500	2537	TLAXCALA	1944-1994
29034	ZOQUIAPAN	-98.478100	19.583333	2536	TLAXCALA	1977-2010
29035	CALPULALPAN	-98.563900	19.586100	2587	TLAXCALA	1975-2010
29040	IXTACUIXTLA	-98.366667	19.316667	2219	TLAXCALA	1975-2005
29041	TEPETITLA	-98.366667	19.266667	2212	TLAXCALA	1975-1991
29050	TEOLOCHOLCO (SMN)	-98.190800	19.243300	2325	TLAXCALA	1955-2008
29052	EL ROSARIO	-98.228900	19.655300	2676	TLAXCALA	1981-2005
29053	TERRENATE	-97.917200	19.476900	2687	TLAXCALA	1981-2005

6.3. Determinación de la probabilidad de heladas

Crisosto (1989), citado por González (2002), destaca que para poder combatir o atenuar el efecto de las bajas temperaturas se debe conocer cuando se producen, identificando los períodos críticos en que éstas ocurren. La forma de obtener esta información es asociando a cada período un valor de probabilidad de ocurrencia de temperaturas mínimas.

De esta forma, se consideró como helada a un descenso de la temperatura del aire, menor o igual a 0 °C., determinada mediante un termómetro ubicado en una caseta reglamentaria a una altura de 1.5 metros.

- a) Para cada estación climatológica, se obtuvieron las fechas de ocurrencia de la última helada (en los primeros meses del año) y de la primera helada (en los últimos meses del año), convirtiendo las fechas a días julianos así como se observa en el ejemplo del Cuadro 12 (Ortiz, 2013).

Cuadro 12. Fechas de la primera y última helada de la estación Santa Cruz, Coyotepec, Puebla. Período 1984-2009.

Año	Fecha de la última helada	Días julianos	Fecha de la primera helada	Días julianos
1984	15 de Marzo	74	08 de Octubre	281
1985	25 de Marzo	84	11 de Octubre	284
1986	21 de Abril	111	17 de Julio	198
1987	01 de Abril	91	03 de Octubre	276
1988	20 de Marzo	79	09 de Septiembre	252
1989	23 de Mayo	143	12 de Octubre	285
1990	23 de Marzo	82	20 de Agosto	232
1991	03 de Abril	93	13 de Octubre	286
1992	08 de Mayo	128	27 de Octubre	300
1993	02 de Junio	153	25 de Julio	206
1994	08 de Mayo	128	23 de Septiembre	266
1995	23 de Febrero	54	08 de Octubre	281
1996	13 de Marzo	72	18 de Octubre	291
1997	12 de Marzo	71	20 de Octubre	293
1998	21 de Mayo	141	25 de Noviembre	329
1999	24 de Mayo	144	24 de Octubre	297
2000	No hubo	0	14 de Julio	195
2001	18 de Abril	108	19 de Octubre	292
2002	30 de Marzo	89	21 de Octubre	294
2003	01 de Abril	91	21 de Octubre	294
2004	20 de Abril	110	13 de Julio	194
2005	20 de Febrero	51	20 de Octubre	293
2006	19 de Abril	109	29 de Octubre	302
2007	04 de Junio	155	22 de Septiembre	265
2008	30 de Mayo	150	18 de Julio	199
2009	24 de Abril	114	20 de Julio	201

- b) Para conocer la probabilidad de ocurrencia de heladas se presentaron cuatro distribuciones teóricas y se seleccionó aquella que se ajustó mejor a la prueba de Kolmogorov – Smirnov, Figura 10.

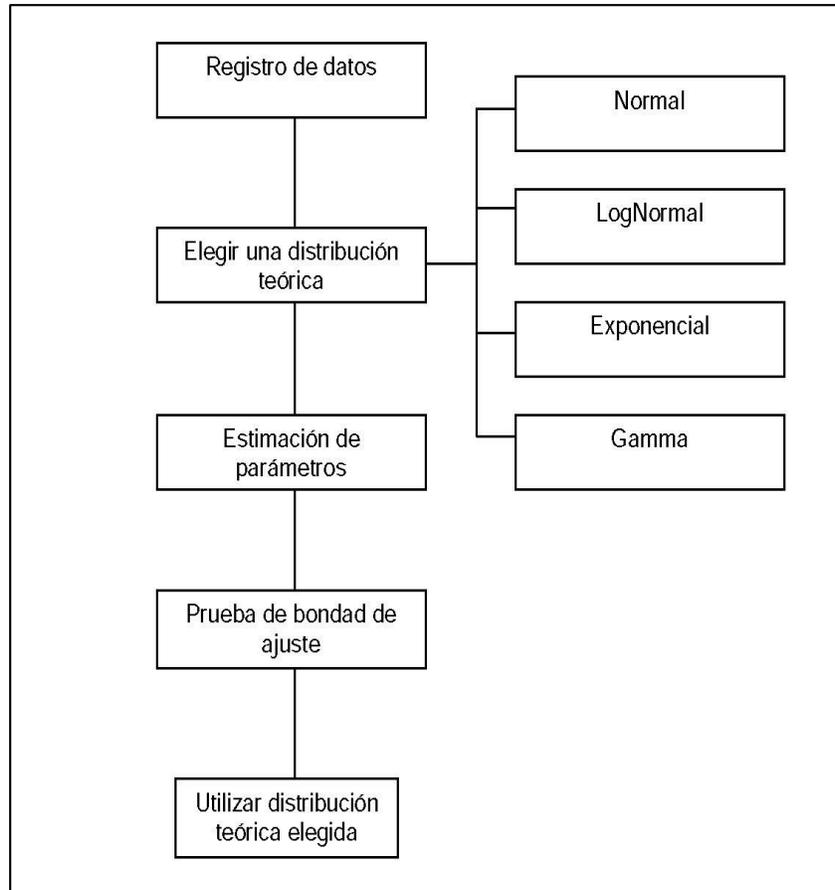


Figura 10. Proceso de selección de una distribución teórica de probabilidad de ocurrencia.

- c) Se realizó el ajuste de Kolmogorov – Smirnov para las cuatro distribuciones. Sin embargo, la distribución que presentó mayor ajuste fue la distribución normal con los diferentes porcentajes de significancia (α). Sin embargo, se da un ejemplo de la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla que se puede apreciar en las Figuras 11, 12, 13 y 14.
- d) Para realizar la prueba de Kolmogorov – Smirnov, se utilizó al programa EasyFit que permite ajustar automáticamente las distribuciones a los datos de la muestra y seleccionar el mejor modelo (MathWave, 2015). La que presentó mayor ajuste fue la distribución normal con los diferentes valores de significancia (α).

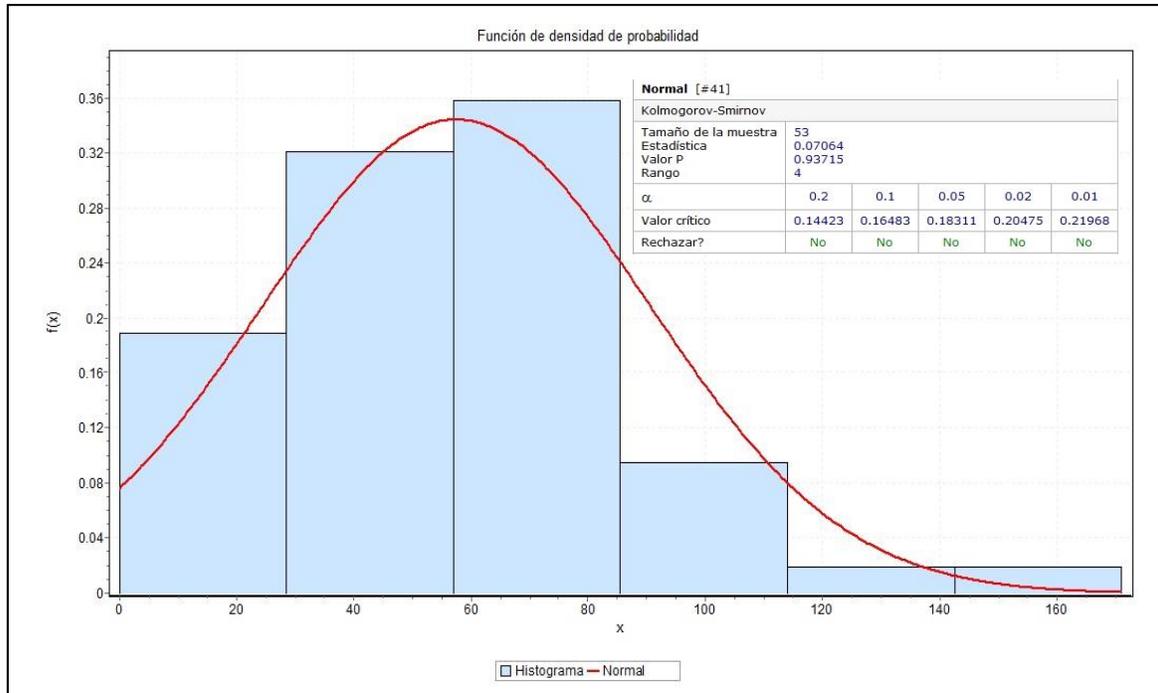


Figura 11. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Normal en la estación climatológica de Ixtacamaxitlán, Puebla.

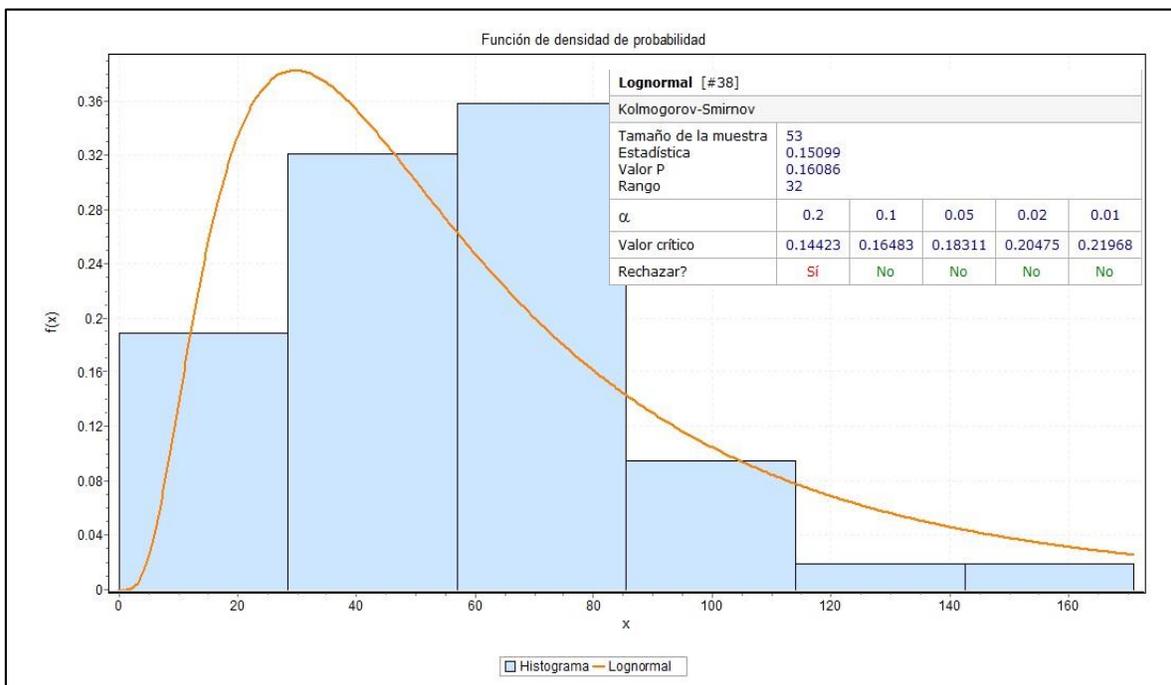


Figura 12. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Lognormal en la estación climatológica de Ixtacamaxitlán, Puebla.

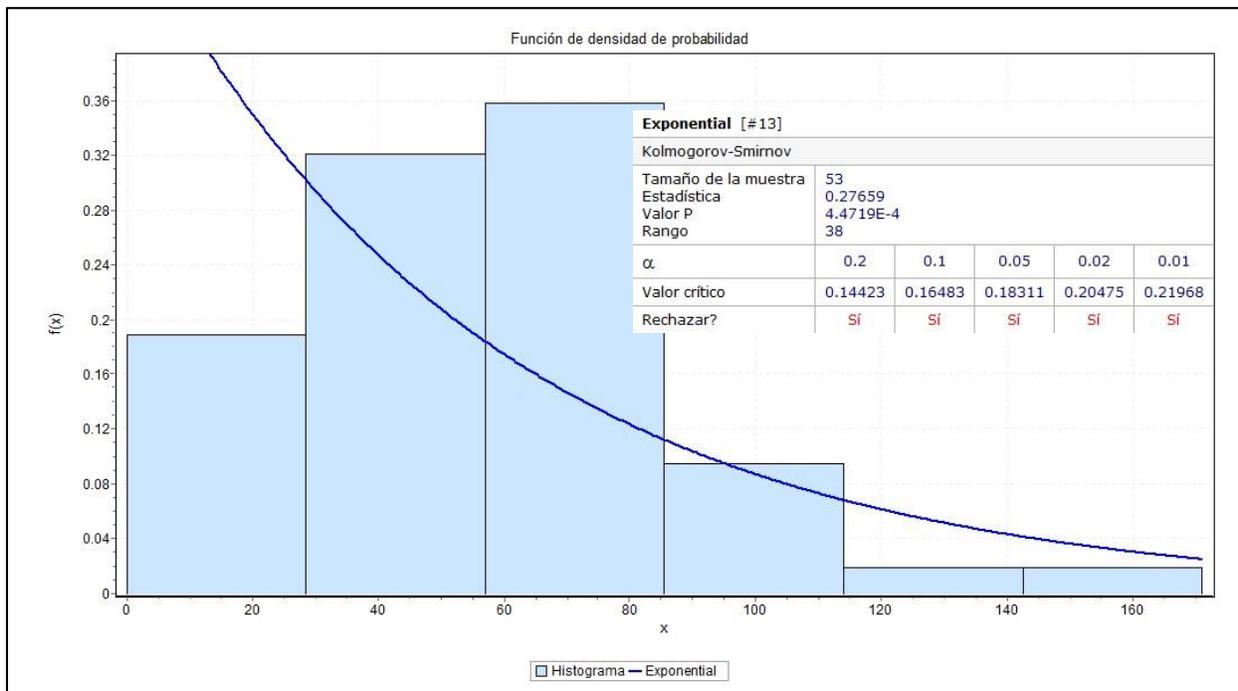


Figura 13. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Exponencial en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla.

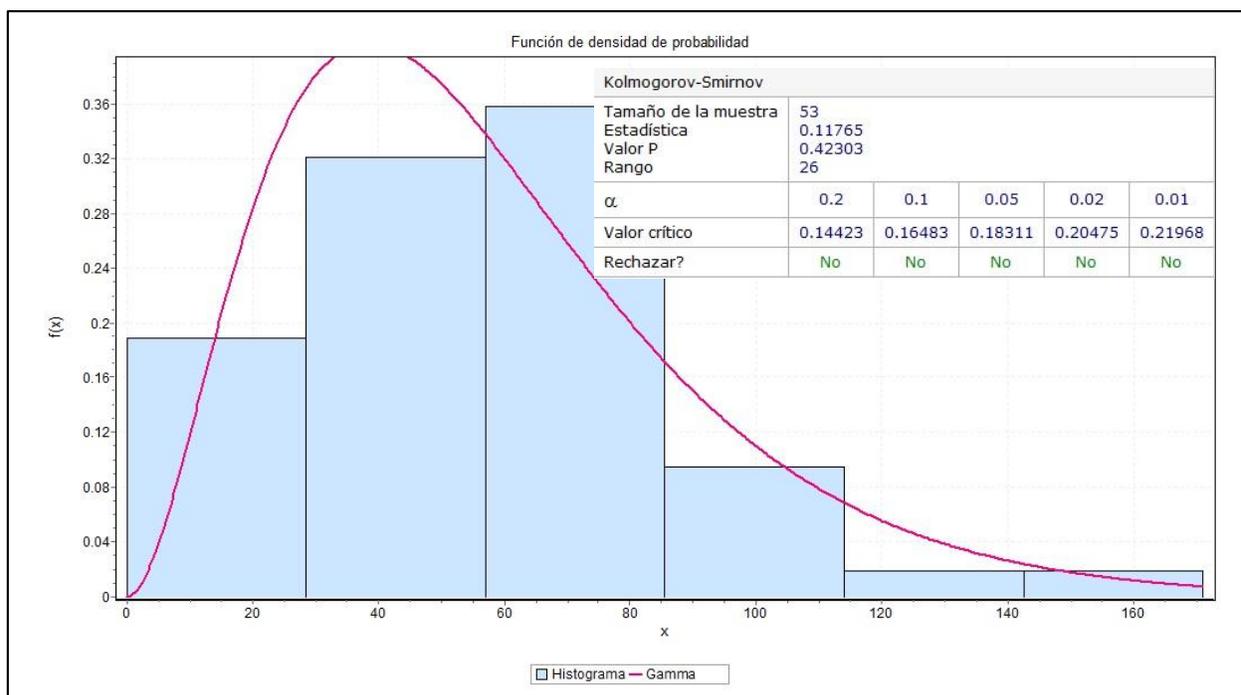


Figura 14. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov - Smirnov para una Distribución Gamma en la estación climatológica de Ixtacamaxtitlán, Puebla

6.4. Determinación del Periodo Libre de Heladas (PLH)

Para determinar el período libre de heladas de cada estación, se utilizó el método de **Thom** citado por Ortiz (2013), ya que consiste en ajustar los datos de las fechas de la última y primera helada a una distribución normal (distribución que presentó mayor ajuste a la prueba de Kolmogorov – Smirnov)

- a) A partir de una probabilidad prefijada (para este estudio se utiliza una Z al 10, 20 y 30%), se establecieron las fechas de ocurrencia con las Ecuaciones 5 y 6 derivadas de la Ecuación 2.

$$Z\alpha = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (\text{Ec. 2})$$

Despejando x de la Ecuación 2 se tiene: $Z\alpha * \sigma + \mu = x$

Ecuación para la última helada; $x = Z\alpha * \sigma + \mu$ (Ec. 5)

Ecuación para la primera helada; $x = -Z\alpha * \sigma + \mu$ (Ec.6)

x = Fecha de ocurrencia de la primera o última helada

$Z\alpha$ = Probabilidad prefijada que se obtiene de tablas de la distribución normal que se han publicado en libros de estadística Figura 16 (Little y Hills, 1976).

Como ejemplo, se puede ver en la Figura 15 el valor de $Z\alpha$ que para una probabilidad del 80% es 0.84.

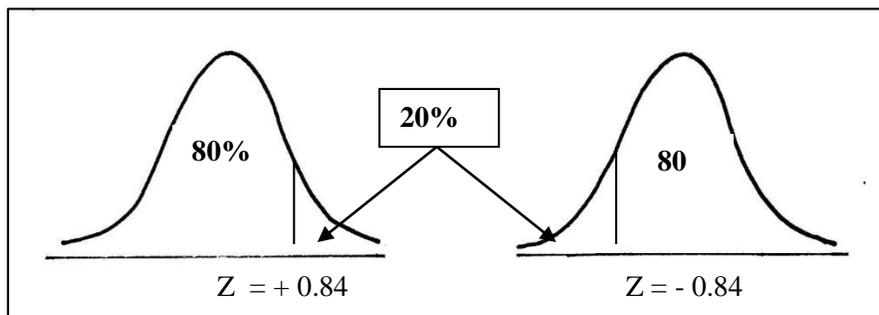
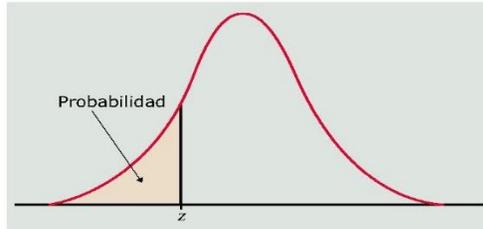


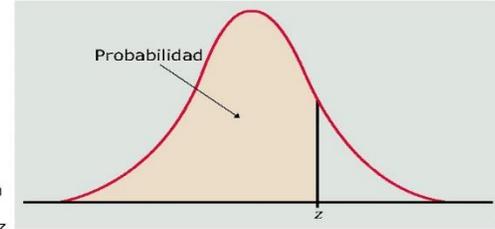
Figura 15. Valor de $Z\alpha$ a una probabilidad del 80% (Ortiz, 2013)

- b) A partir de las fechas de la primera y última heladas se obtuvo el período libre de heladas.

El valor de la tabla para z es el área bajo la curva de la normal estándar a la izquierda de z



El valor de la tabla para z es el área bajo la curva de la normal estándar a la izquierda de z



z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
-1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
-1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
-0.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
-0.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
-0.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
-0.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
-0.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
-0.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
-0.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
-0.2	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3936	.3897	.3859
-0.1	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4286	.4247
-0.0	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995
3.3	.9995	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997
3.4	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9998

Figura 16. Tabla de la distribución normal

6.5. Generación de los mapas de riesgo

Según Silva (2002), la altitud es un factor climático importante en las zonas montañosas, siendo un hecho notorio que la temperatura media del aire cerca del suelo disminuye en dirección a cotas más elevadas, determinando una verdadera zonificación de la temperatura (Martínez *et al.*, 1991).

Por tal motivo:

- a) Se procedió a obtener gradientes altitudinales ajustando modelos lineales, graficando el Periodo Libre de Heladas (PLH), fecha de la Primera Helada (PH) y Última Helada (UH) con respecto a la altitud media sobre el nivel del mar mediante la función de regresión lineal de la Ecuación 7 (Fries *et al.*, 2012).

$$X = r * z + b: \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde: X = Es la variable dependiente: Periodo libre de heladas (PLH), Primera Helada (PH) y Última Helada (UH) a diferentes porcentajes de probabilidad.

r = La pendiente (gradiente altitudinal).

b = La intersección de la regresión.

z = La altitud (m).

- b) Se utilizó una técnica sencilla que consiste en reducir todas las mediciones a un nivel de referencia a un límite inferior de la zona de estudio con la Ecuación 8 (Fries *et al.*, 2012).

$$X_{Det} = X + (r * (Z_{Det} - Z_{Estación})) \quad (\text{Ec. 8.})$$

X_{Det} = Es la variable dependiente. Periodo libre de heladas (PLH), Primera Helada (PH) y Última Helada (UH) a diferentes porcentajes de probabilidad.

r = Gradiente altitudinal generado con los modelos lineales de las variables en función de la altitud.

Z_{Det} =Reducción de la altitud a un nivel de referencia, en este caso el valor es de 1000 m., porque es el límite inferior de la zona de estudio.

$Z_{Estación}$ = Altitud de la estación climatológica (m)

La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos (Villatoro *et al.*, 2008). Por lo tanto, diversos métodos estadísticos han sido desarrollados para predecir la distribución espacial de variables climáticas que difieren en su concepto y formulación matemática (Núñez *et al.*, 2014). Métodos de interpolación locales como polígonos de Thiessen e inverso de distancia ponderada (IDW) han sido de los más frecuentemente utilizados en la predicción climática y desarrollo cartográfico (New *et al.*, 2000).

- c) Dicho lo anterior, se utilizó el método de interpolación conocido como “distancia inversa ponderada (IDW)”, para generar los mapas de las variables dependientes XDet (PLH, PH y UH) a la probabilidad de 10, 20 y 30% con el programa ArcMap v. 10.0 de ESRI. El método generó interpolaciones de acuerdo a los datos que presenta cada estación.

Las muestras de elevación o puntos sobre el terreno no representan la superficie terrestre de manera continua por sí mismas, y es necesario utilizar un formato que permita modelar la elevación como una superficie continua. De los diferentes formatos conocidos el más común entre los usuarios normalmente es el Modelo Digital de Elevación (MDE).

Longley *et al.* (2005) mencionan que los modelos digitales de elevación (MDE) son la forma más común y eficaz de representar la superficie terrestre como un fenómeno

continuo que puede ser medido y descrito en cualquier punto sobre la misma con base en un conjunto de variables.

Sin embargo Fries *et al.* (2012) encuentra con la Ecuación 9 la forma de reestablecer la distribución vertical para cada pixel de los mapas de interpolación.

- d) Con los mapas de interpolación obtenidas con el método de (IDW), junto con el MDE de la zona de estudio (SIGA, 2010), y mediante la función de álgebra de mapas en el Sistema de Información Geográfica ArcMap v. 10.0 de ESRI., se construyeron los mapas georreferenciados en formato Raster con píxeles de 30 x 30 m., utilizando la Ecuación 9.

$$X_{(x,y)} = X_{Det} + (r * (Z_{(x,y)}^{MDE} - Z_{Det})) \quad (\text{Ec. 9})$$

En donde $Z_{(x,y)}^{MDE}$ es el mapa Raster del Modelo Digital de Elevación (MDE)

El ejemplo se puede observar para la variable dependiente del PLH al 10% en la Figura 17

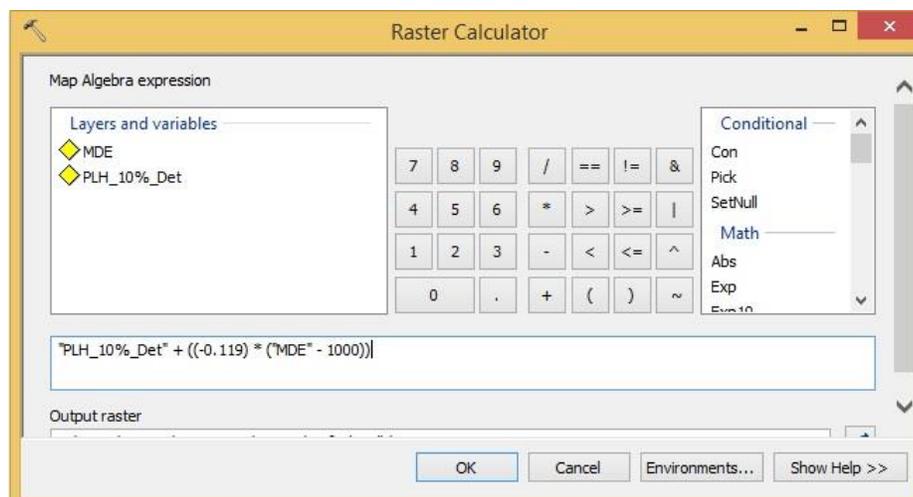


Figura 17. Álgebra de mapas Sistema de Información Geográfica ArcMap v. 10.0

- e) Se realizó la clasificación de la zona de estudio a cada 50 días para el Periodo Libre de Heladas con los diferentes porcentajes de probabilidad mediante el módulo CLASSIFIED de ArcMap v. 10.0, (Ver Figura 18).
- f) Se realizó la clasificación de la zona de estudio en meses para la primera decena del año (Última Helada) y, la segunda decena del año (Primera Helada) con los diferentes porcentajes de probabilidad mediante el módulo CLASSIFIED de ArcMap v. 10.0, (Ver Figura 19 y 20).

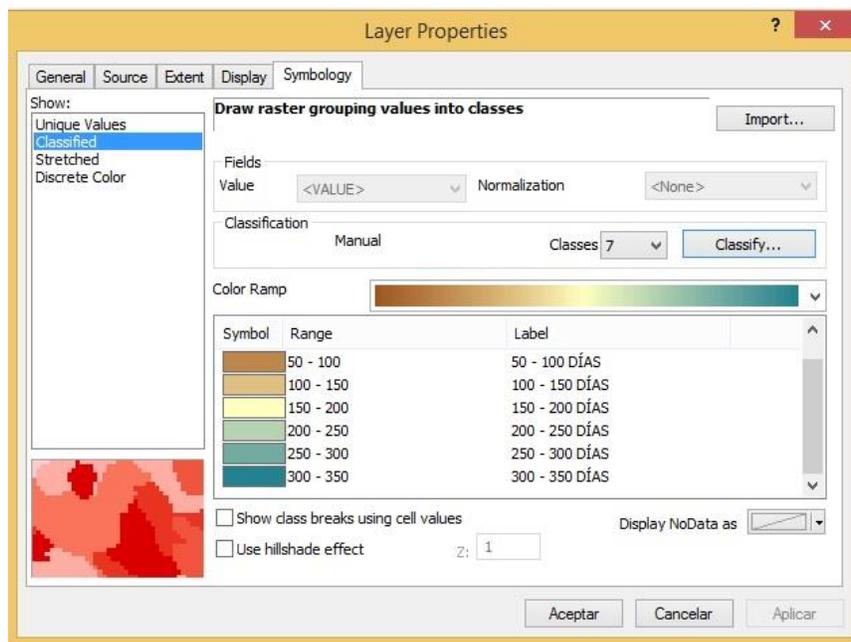


Figura 18. Clasificación de la zona de estudio para el Periodo Libre de Heladas

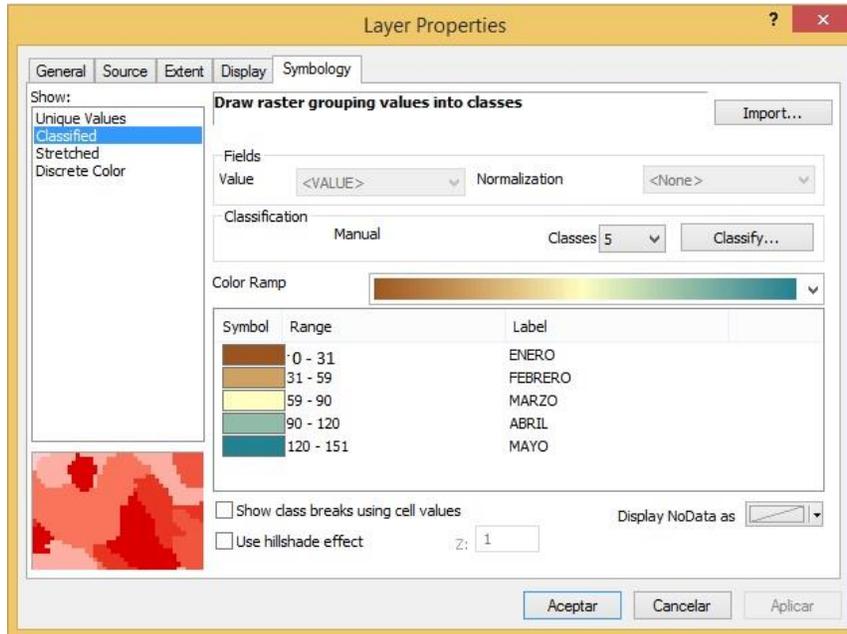


Figura 19. Clasificación de la zona de estudio para la primera decena del año

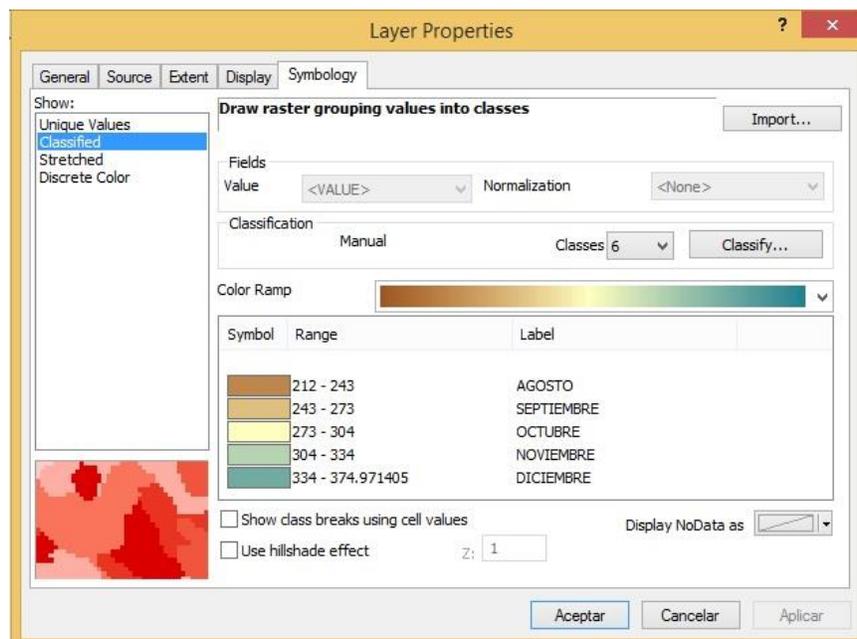


Figura 20. Clasificación de la zona de estudio para la segunda decena del año

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo permitió caracterizar de una manera precisa el fenómeno de las heladas en la zona de estudio y de acuerdo a la metodología aplicada se logró determinar las áreas que son susceptibles a este fenómeno con diferentes grados de riesgo, presentando gráficas y mapas de probabilidad de ocurrencia.

Para cada una de las estaciones meteorológicas Cuadro 13 y 14, se presenta información de la primera, última y, período libre de heladas con probabilidades del 10, 20 y 30% de ocurrencia.

Cuadro 13. Probabilidad de ocurrencia de la primera, última y período libre de heladas, de las estaciones climatológicas del estado de Puebla.

ESTACIÓN	ÚLTIMA HELADA AL 10% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 10% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 10% (DÍAS)	ÚLTIMA HELADA AL 20% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 20% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 20% (DÍAS)	ÚLTIMA HELADA AL 30% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 30% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 30% (DÍAS)
AHUATEPEC	24 de febrero	6 de diciembre	285	11 de febrero	12 de diciembre	304	2 de febrero	17 de diciembre	318
BALCON DIABLO A.TEXALUCA	25 de febrero	25 de noviembre	273	15 de febrero	3 de diciembre	291	7 de febrero	9 de diciembre	305
MORELOS CAÑADA	24 de marzo	26 de octubre	216	10 de marzo	7 de noviembre	242	27 de febrero	15 de noviembre	261
CAPULUAQUE	28 de marzo	21 de noviembre	238	14 de marzo	1 de diciembre	262	3 de marzo	9 de diciembre	281
CD. SERDAN (DGE)	12 de mayo	28 de agosto	108	23 de abril	17 de septiembre	147	9 de abril	2 de octubre	176
GUADALUPE BUENAVISTA	17 de mayo	27 de septiembre	133	3 de mayo	11 de octubre	161	23 de abril	20 de octubre	180
IXTACAMAXTITLAN (CFE)	10 de abril	21 de octubre	194	27 de marzo	2 de noviembre	220	16 de marzo	11 de noviembre	240
PALMAR DE BRAVO	14 de mayo	20 de octubre	159	26 de abril	3 de noviembre	191	13 de abril	14 de noviembre	215
SAN LUIS ATEXCAC	22 de abril	11 de octubre	172	10 de abril	22 de octubre	195	1 de abril	30 de octubre	212
S.M.TEXMELUCAN LABASTIDA	25 de marzo	7 de noviembre	227	9 de marzo	20 de noviembre	256	25 de febrero	29 de noviembre	277
SAN PEDRO TEMAMANTLA	24 de marzo	19 de noviembre	240	8 de marzo	29 de noviembre	266	24 de febrero	6 de diciembre	285
SAN SALVADOR EL SECO (DGE)	4 de junio	29 de agosto	86	13 de mayo	21 de septiembre	131	27 de abril	7 de octubre	163
SANTA CRUZ COYOTEPEC	28 de mayo	1 de agosto	65	12 de mayo	19 de agosto	99	30 de abril	31 de agosto	123
TECAMACHALCO	2 de abril	30 de octubre	211	21 de marzo	11 de noviembre	235	11 de marzo	19 de noviembre	253
SANTA RITA TLAHUAPAN	6 de marzo	6 de noviembre	245	22 de febrero	20 de noviembre	271	13 de febrero	30 de noviembre	290
GUADALUPE VICTORIA	23 de abril	18 de octubre	178	10 de abril	29 de octubre	202	1 de abril	6 de noviembre	219
LIBRES (SMN)	26 de abril	30 de octubre	187	10 de abril	12 de noviembre	216	30 de marzo	21 de noviembre	236
HUAQUECHULA	No hay heladas	No hay heladas	365	No hay heladas	No hay heladas	365	No hay heladas	No hay heladas	365
FRANCISCO I. MADERO	24 de mayo	13 de septiembre	112	6 de mayo	28 de septiembre	145	23 de abril	9 de octubre	169
ACAJETE	11 de abril	26 de octubre	198	23 de marzo	10 de noviembre	232	9 de marzo	21 de noviembre	257
GUADALUPE VICTORIA	8 de abril	14 de octubre	189	26 de marzo	28 de octubre	216	17 de marzo	7 de noviembre	235
SAN MIGUEL CANOA	1 de marzo	12 de diciembre	286	19 de febrero	17 de diciembre	301	11 de febrero	21 de diciembre	313
STA. CATARINA LOS REYES	13 de abril	14 de octubre	184	31 de marzo	25 de octubre	208	22 de marzo	2 de noviembre	225
ESPERANZA	1 de mayo	19 de octubre	171	15 de abril	31 de octubre	199	4 de abril	8 de noviembre	218
EL BATAN	21 de marzo	7 de noviembre	231	9 de marzo	18 de noviembre	254	1 de marzo	26 de noviembre	270
SANTA MA. TECHACHALCO	5 de febrero	14 de noviembre	282	27 de enero	24 de noviembre	301	21 de enero	1 de diciembre	314
HUILANGO E-2	24 de enero	31 de diciembre	341	17 de enero	31 de diciembre	348	13 de enero	31 de diciembre	352
ZARAGOZA	25 de marzo	6 de noviembre	226	13 de marzo	17 de noviembre	249	4 de marzo	25 de noviembre	266
LOS HUMEROS (CFE)	25 de abril	26 de septiembre	154	6 de abril	13 de octubre	190	23 de marzo	26 de octubre	217
SAN JUAN TETLA 7 NORTE	20 de abril	24 de octubre	187	9 de abril	2 de noviembre	207	1 de abril	8 de noviembre	221

Cuadro 14. Probabilidad de ocurrencia de la primera, última y período libre de heladas, de las estaciones climatológicas del estado de Tlaxcala.

ESTACIÓN	ÚLTIMA HELADA AL 10% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 10% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 10% (DÍAS)	ÚLTIMA HELADA AL 20% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 20% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 20% (DÍAS)	ÚLTIMA HELADA AL 30% (FECHA)	PRIMERA HELADA AL 30% (FECHA)	PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 30% (DÍAS)
APIZACO	12 de abril	3 de octubre	174	30 de marzo	15 de octubre	199	21 de marzo	24 de octubre	217
ATLANGA SAN JOSE	28 de abril	29 de septiembre	154	15 de abril	10 de octubre	178	5 de abril	19 de octubre	197
CUAMANTZINGO	6 de mayo	16 de octubre	163	24 de abril	30 de octubre	189	15 de abril	8 de noviembre	207
CUAPIAXTLA	1 de mayo	4 de octubre	156	12 de abril	16 de octubre	187	30 de marzo	25 de octubre	209
EL CARMEN	28 de abril	15 de septiembre	140	13 de abril	2 de octubre	172	2 de abril	13 de octubre	194
ESTOYITO	25 de marzo	30 de noviembre	250	13 de marzo	7 de diciembre	269	4 de marzo	12 de diciembre	283
HUEYOTLIPAN	13 de abril	15 de octubre	185	2 de abril	30 de octubre	211	25 de marzo	10 de noviembre	230
HUAMANTLA	24 de abril	7 de octubre	166	8 de abril	21 de octubre	196	28 de marzo	31 de octubre	217
LIMITES	20 de abril	27 de octubre	190	2 de abril	8 de noviembre	220	19 de marzo	17 de noviembre	243
SAN ANTONIO CALPULALAPAN	20 de mayo	4 de agosto	76	25 de abril	30 de agosto	127	7 de abril	18 de septiembre	164
SANCTORUM	18 de marzo	7 de diciembre	264	6 de marzo	13 de diciembre	282	26 de febrero	18 de diciembre	295
ZITLALTEPEC	16 de abril	7 de octubre	174	5 de abril	19 de octubre	197	29 de marzo	27 de octubre	212
TOCATLAN	12 de marzo	24 de noviembre	257	28 de febrero	3 de diciembre	278	18 de febrero	9 de diciembre	294
TLAXCO	17 de mayo	22 de septiembre	128	29 de abril	7 de octubre	161	16 de abril	18 de octubre	185
ZOQUIAPAN	1 de mayo	5 de octubre	157	18 de abril	20 de octubre	185	9 de abril	31 de octubre	205
CALPULALPAN	19 de mayo	29 de agosto	102	26 de abril	22 de septiembre	149	8 de abril	9 de octubre	184
IXTACUIXTLA	15 de abril	19 de octubre	187	4 de abril	30 de octubre	209	27 de marzo	7 de noviembre	225
TEPETITLA	2 de mayo	24 de noviembre	206	18 de abril	1 de diciembre	227	9 de abril	7 de diciembre	242
TEOLOCHOLCO (SMN)	21 de febrero	27 de noviembre	279	11 de febrero	5 de diciembre	297	4 de febrero	10 de diciembre	309
EL ROSARIO	17 de mayo	20 de agosto	95	28 de abril	10 de septiembre	135	15 de abril	26 de septiembre	164
TERRENATE	18 de marzo	9 de noviembre	236	6 de marzo	21 de noviembre	260	24 de febrero	30 de noviembre	279

Para cada una de las estaciones meteorológicas se presenta una gráfica con dos curvas, una a la izquierda representando a la probabilidad de la última helada y, otra a la derecha representando a la probabilidad de la primera helada, entre ambas se encuentra el periodo libre de heladas (Anexo A)

En el eje horizontal se leen los días del año y en el eje vertical se lee la probabilidad de heladas para un día dado es decir, la probabilidad de que ocurra una helada después de un día dado para la última helada y la probabilidad de que ocurra una helada antes de un día dado para las primeras heladas.

Para mayor ejemplo se muestra la Figura 21, que corresponde a la estación climatológica del Balcón del diablo en el estado de Puebla, en donde se lee el número 46 correspondiente al 15 de febrero en donde se espera una última helada al 20%. De la misma forma en la misma gráfica se lee un número 337 correspondiente al 3 de diciembre en donde se espera una primera helada a la probabilidad del 20% para el mismo lugar. La diferencia del número de la primera helada con el número de la última helada corresponde al periodo libre de heladas que para dicha estación es de 291 días.

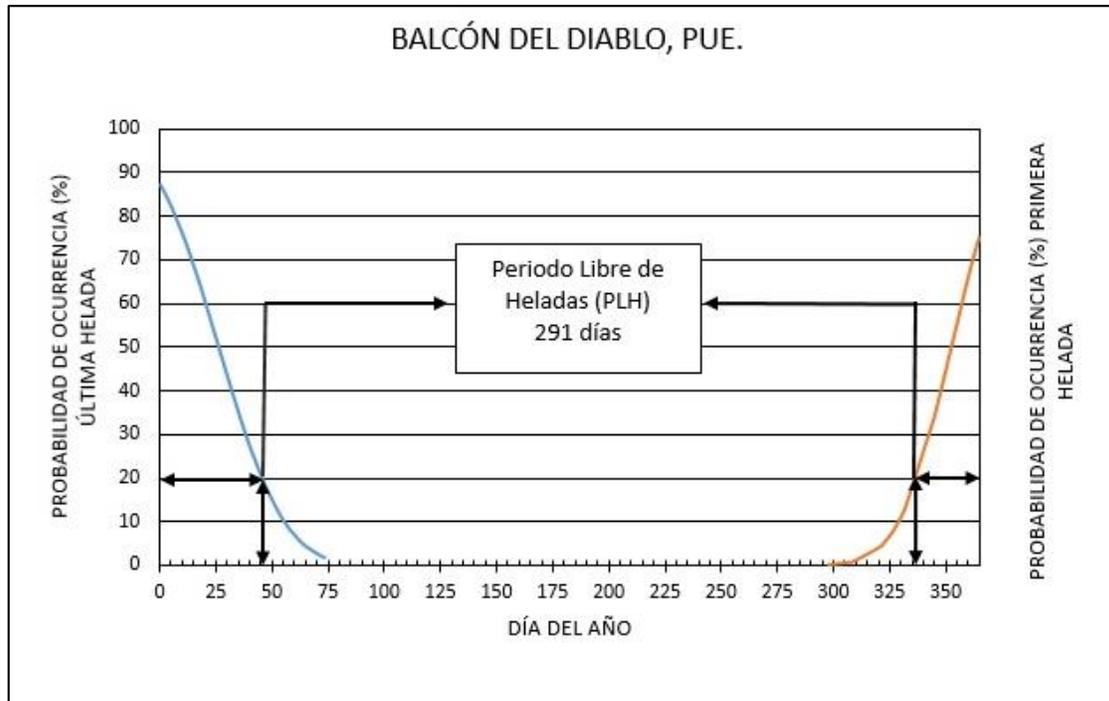


Figura 21. Primera, última y periodo libre de heladas al 20%

En el ANEXO B, Se presentan los mapas de la distribución espacial de las últimas y primeras heladas, realizando una clasificación por meses (primera decena del año para las últimas heladas y segunda decena del año para las primeras heladas). De la misma forma se muestra el periodo libre de heladas clasificándolo a cada 50 días.

7.1. Discusión

En la figura 22 se puede observar el Periodo Libre de Heladas a una probabilidad de riesgo de un 20%, que en la parte centro de la zona de estudio como: El Carmen, Cuapiaxtla, Huamantla, Apizaco, Libres, El Batán entre otros mantienen entre 100 a 250 días libres de heladas, lugares que son factibles para la agricultura tradicional, y el fenómeno de las heladas no pueda causar daño irreversibles no estropeando la calidad de los cultivos.

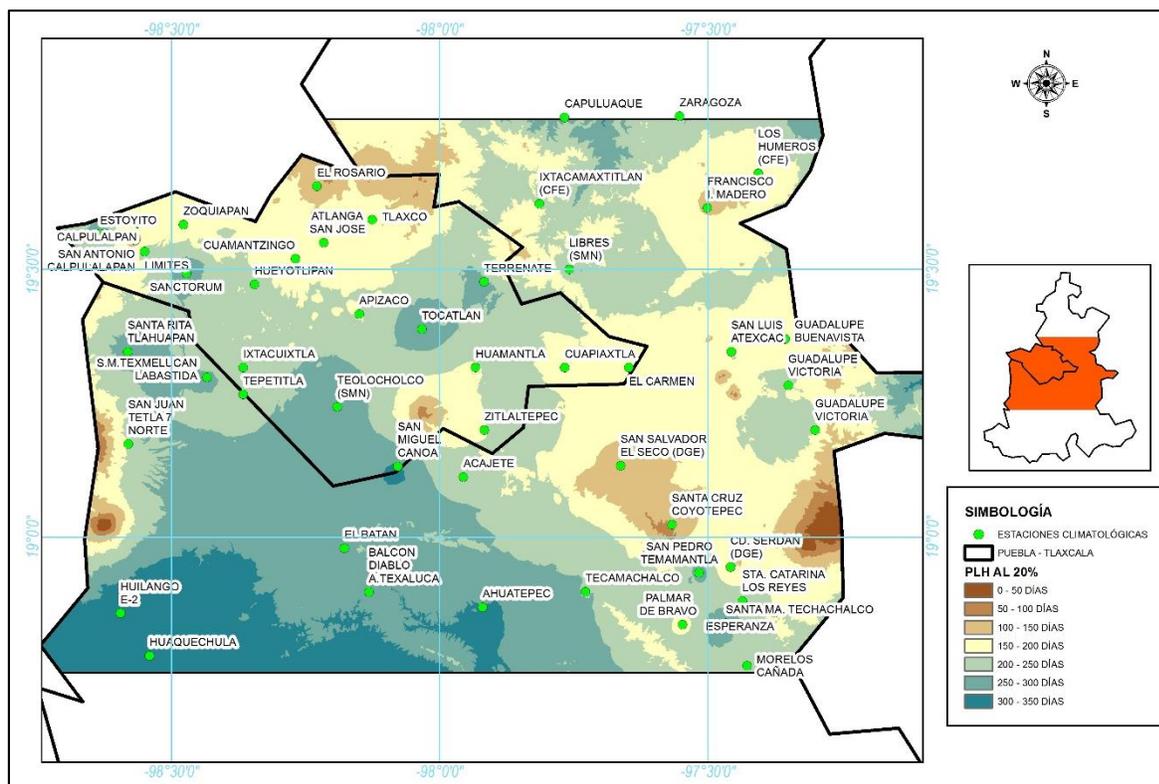


Figura 22. Probabilidad del Periodo Libre de heladas al 20%

En la Figura 23 se representa el PLH al 30% de probabilidad de riesgo, se puede observar que el área de peligro de las zonas aumenta, el número de localidades arriba de 150 días libres de heladas son mayores que a una probabilidad del 20%, sí San Salvador el Seco se mantenía a una probabilidad de riesgo al 20% de 100 a 150 días, ahora a un 30% de probabilidad se encuentra en el rango de 150 a 200 días. Sin embargo a la probabilidad del 30% es muy poco confiable para los agricultores ya que exponen a que sus cultivos puedan ser dañados por las heladas tempranas.

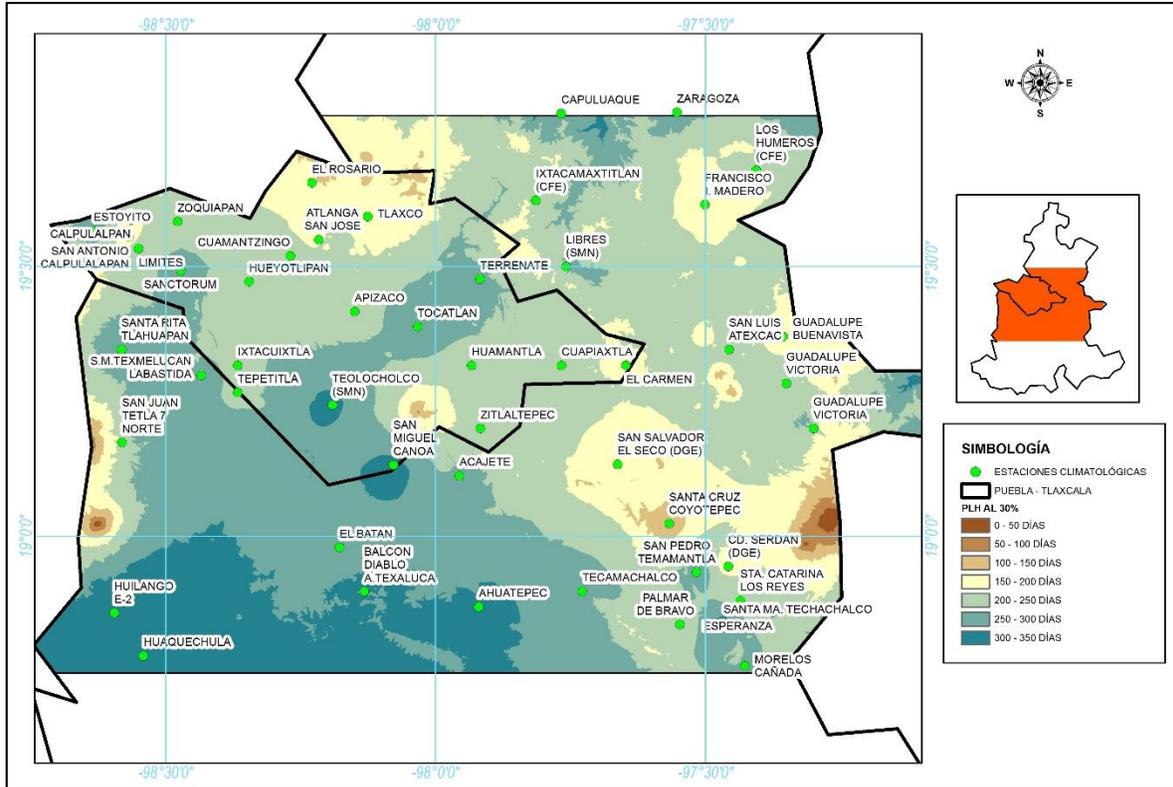


Figura 23. Probabilidad del Periodo Libre de heladas al 30%

Se considera que las primeras heladas del segundo semestre del año en la zona de estudio a un 20%, está comprendido a partir del mes de agosto que corresponden a las zonas más frías, donde hay heladas tempranas. Los lugares son: Santa Cruz Coyotepec (Cuadro 13), El Rosario (Cuadro 14) y las partes más altas pegadas a los volcanes (Figura 24). Este fenómeno puede dañar las siembras tardías o a variedades de cultivos de ciclo largo que se hayan sembrado al inicio de la primavera.

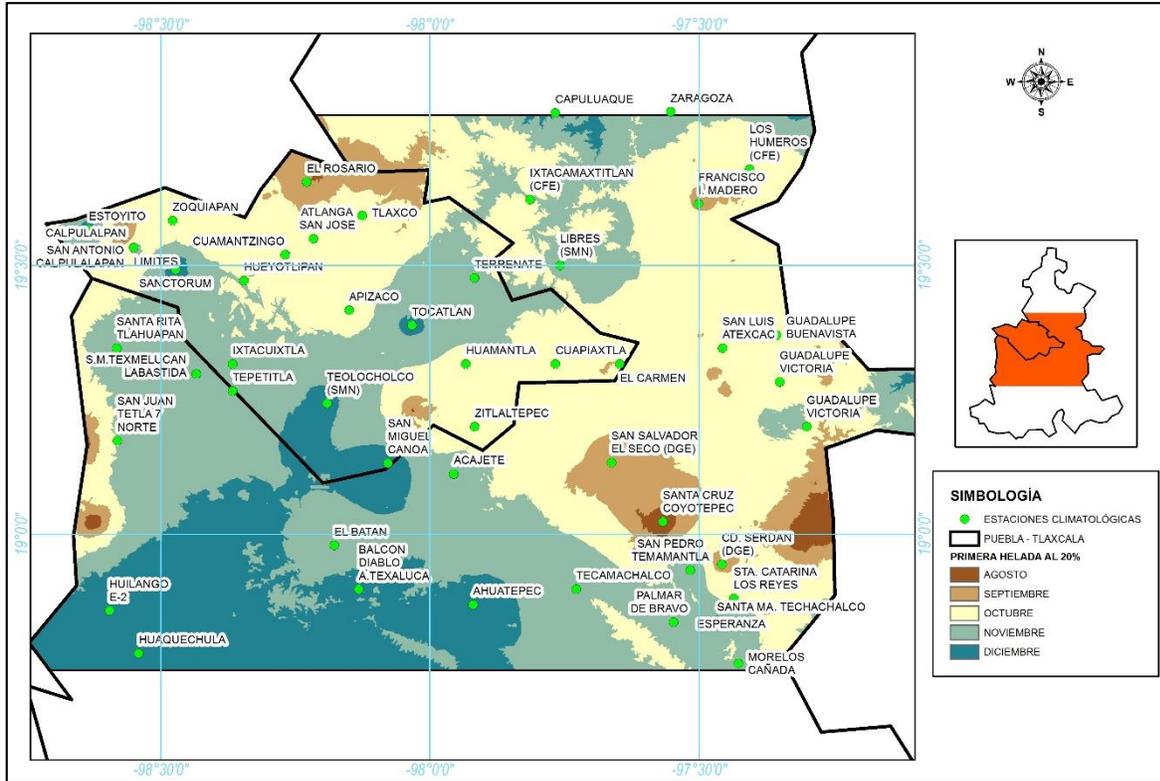


Figura 24. Probabilidad de la Primera Helada al 20%

Para las últimas heladas que se presentan en el primer semestre del año al 20%, terminan en el mes de mayo para las zonas de Francisco I. Madero, San Salvador el Seco entre otros (Cuadro 13 y Figura 25). Estas heladas suelen tener efectos destructivos en cultivos que inician su desarrollo a principios de primavera, como algunos frutales. Esto concuerda con el estudio de Moreno *et al.* (2011), donde indica que de acuerdo a la cartografía de temperaturas mínimas del (SMN) hay más de 100 días con heladas concentrándose este fenómeno entre noviembre a marzo en más de la mitad del territorio de país.

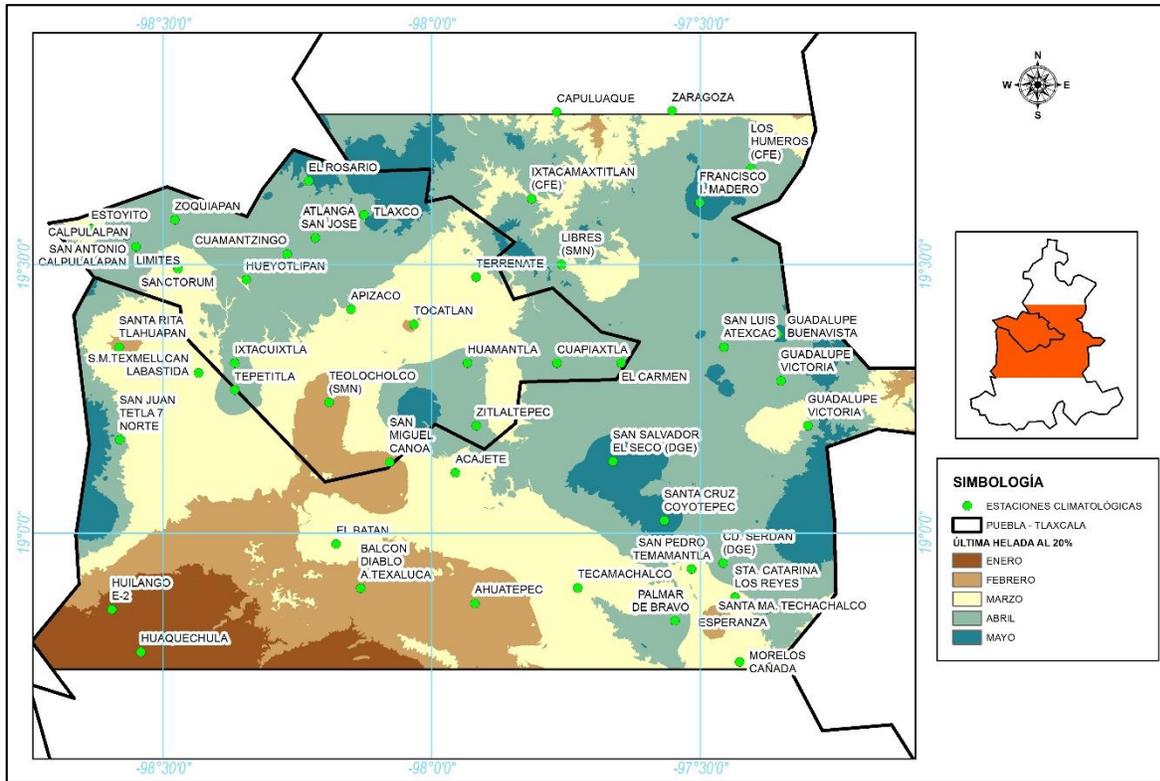


Figura 25. Probabilidad de la Última Helada al 20%

La topografía irregular de la zona de estudio es un factor determinante para que la distribución espacial y temporal de las heladas sea muy variable. Por lo tanto las zonas más altas son más propensas a heladas tempranas en otoño y heladas posteriores en primavera (Peralta y Martínez, 2008). Es por eso que existen zonas con heladas casi todo el año y zonas en donde las heladas son muy desconocidas, como ejemplo se muestra la estación climatológica de Santa Cruz Coyotepec, Puebla con una altitud aproximada de 2415 m. en donde se puede ver en la Figura 26 el comportamiento de la serie de la primera helada (margen derecha) y de la última helada (margen izquierda), ambas líneas casi se unen sobre el eje horizontal, debido a que hay un periodo libre de heladas a un 20% de probabilidad muy corto de 99 días y presencia de heladas casi todo el año .

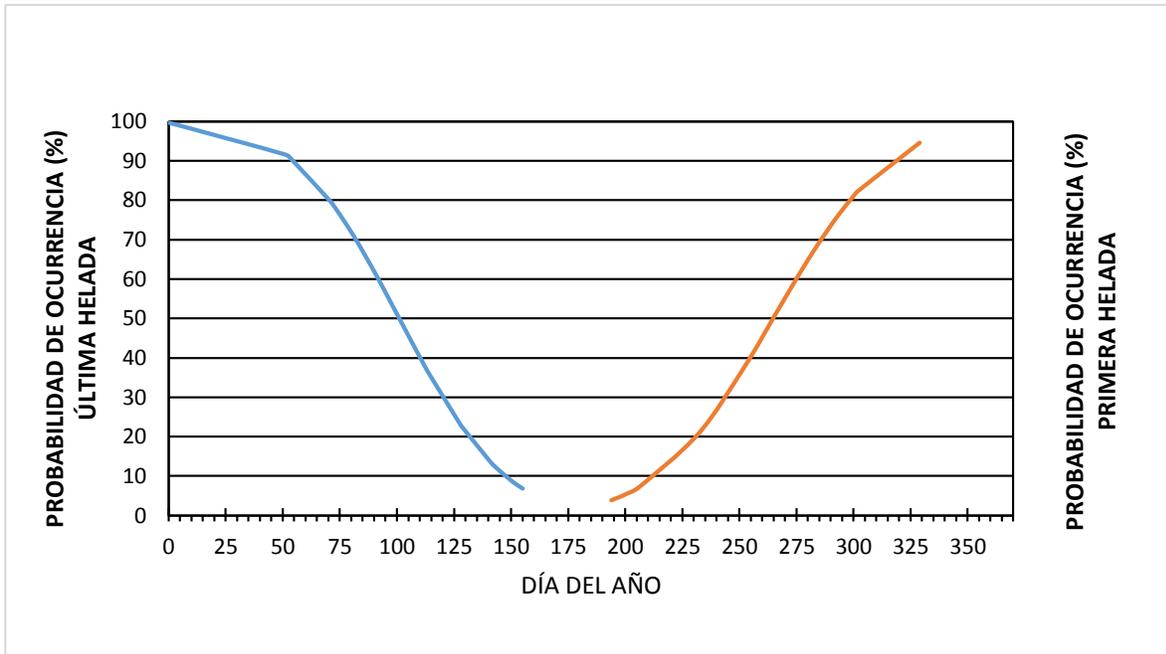


Figura 26. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa Cruz Coyotepec, Puebla.

Por otro lado, se encuentra la estación climatológica del Balcón del Diablo, Ahuatepec, Techachcalco (Cuadro 13 y Figura 27) con periodo libre de heladas del orden de 300 días. En la cual las heladas no representan obstáculo serio para la agricultura tradicional de la región.

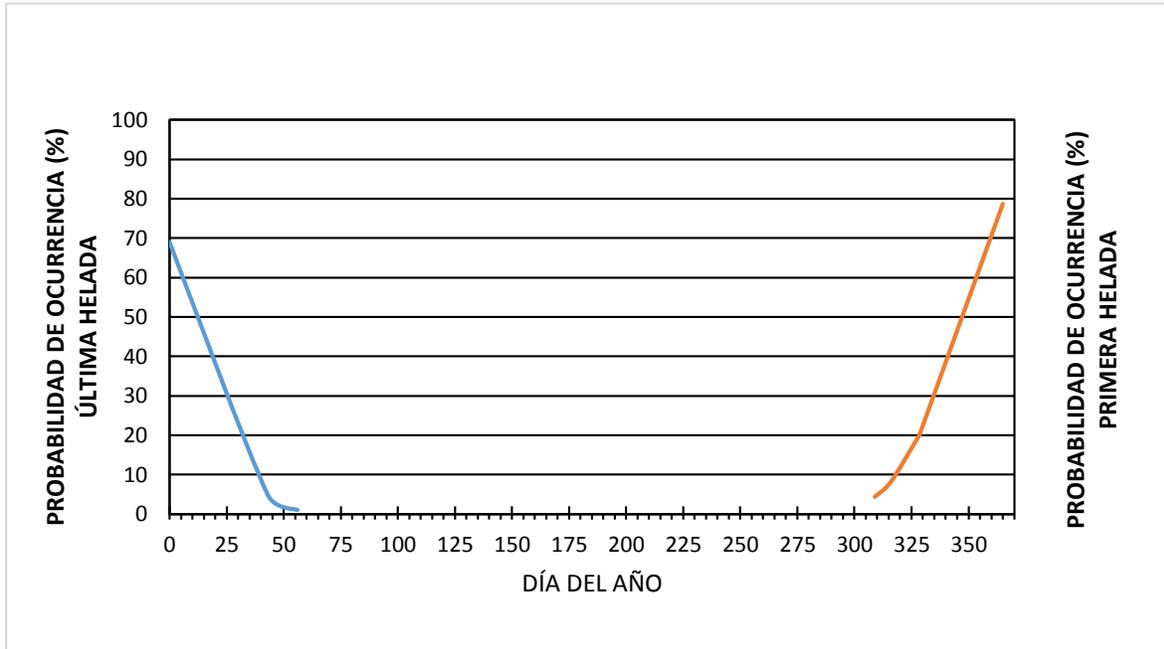


Figura 27. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa María Techachalco, Puebla.

En las localidades de Huilango, Huaquechula en el estado de Puebla, las heladas son fenómenos casi desconocidos que se encuentra en la parte Suroeste de la zona de estudio, la estación climatológica de Huaquechula no presenta gráfica por la falta de heladas.

El periodo libre de heladas varía desde dos meses como es el caso de Santa Cruz Coyotepec estado de Puebla, hasta aproximadamente 10 meses en el lugar de San Miguel Canoa.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Con las gráficas del presente trabajo, permiten el cálculo de las últimas y primeras heladas a diferentes probabilidades de riesgo, de tal forma que el agricultor pueda seleccionar una fecha de siembra y cosecha óptima.

Las áreas con los diferentes riesgos de probabilidad de heladas en general, pueden ser identificadas geográficamente en los mapas mostrados en este documento (Anexo B).

En la explotación agrícola, estos resultados alertaran al agricultor para que pueda tomar las medidas necesarias y disminuir o evitar los efectos de las heladas.

En base a los resultados obtenidos, se puede planear futuras explotaciones agrícolas susceptibles al fenómeno de las heladas seleccionando aquellas variedades tolerantes al frío o zonas con menor riesgo de heladas.

8.2. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos de esta investigación, se recomienda realizar la siembra consultando las fechas y el periodo libre de heladas para cada lugar.

Con la etapa fenológica de cada cultivo (Cuadro 9) y de las fechas de la primera y última helada de cada lugar, se recomienda consultar los mapas del periodo libre de heladas y de esta forma programar mejor las fechas de siembra.

Por otra parte, debido a que la resistencia de los cultivos al fenómeno de las heladas varía de una especie a otra, se recomienda el estudio de otro nivel de temperaturas por encima y debajo de 0 °C para determinar con mayor precisión la estación de crecimiento para diferentes cultivos que se producen en la región de estudio.

IX. LITERATURA CITADA

- Anguiano C., J.; Alcántar R., J. J.; Ruiz C., J. A.; González A., I. J.; Vizcaíno V., I.; Regalado R., R. y De La Mora O., C. 2003. Recursos edafo-climáticos para la planeación del sector productivo en el Estado de Michoacán. Libro Técnico.
- Aparicio F.J. 2005. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa, 303 pp.
- Bettencourt, M.L. 1980. Contribuição para o estudo das geadas em Portugal Continental. In: O Clima de Portugal, Fasc. XX. Lisboa: I.N.M.G.
- Blanc, M.L., Geslin, H., Holzberg, I.A. & Mason, B. 1963. Protection against frost damage. WMO, Technical Note, No. 51. Geneva, Switzerland. 62p.
- Burgos, J. J. 1963. Las heladas en Argentina. INTA Colección Científica, 388 pág. Buenos Aires, Argentina.
- Castro Z., R. y R. Arteaga R. 1993. Introducción a la meteorología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Méx. 275p.
- Crisosto, C.H. 1989. Métodos para controlar o disminuir las incidencias de heladas. Rev. Frutícola 10(2): 44-51.
- Cunha, J.M. 1952. Contribuição para o estudo do problema das geadas em Portugal. Relatório final do Curso de Engenheiro Agrónomo. I.S.A., Lisboa.
- Day, P. C. 1911. Frost data of the United States and Length of the Crop-growing season. (Weather Bur. Bul. V)., Washington.
- Engelbert, P. 1997. The complete weather resource. Vol. 2: Weather Phenomena. UXL. pp. 368.

Fries. A., Rollenbeck. R., Nauß, T., Peters, T. y Bendix, J. 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology* 152, 17– 30

Grassi Cantero, B.A. 1983. Riesgo de primeras y últimas heladas en Puebla y Tlaxcala respecto a los cultivos básicos. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa de Agrometeorología. Chapingo, Méx.

González, J.A. 2002. Probabilidad de ocurrencia de temperaturas mínimas capaces de causar daños de incidencia agrícola en Cauquenes. Memoria de título, Ing. Civil Agríc. Universidad de Concepción, Fac. Ing. Agríc. Chillán, Chile.

INIFAP-CIRPAC-C.E. Uruapan. Uruapan, Michoacán. 173 p.

Little T. M. y F. J. Hills. 1976. Métodos estadísticos para la investigación en agricultura. México: Trillas, 270 pp.

Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D.W. Rhind. 2005. *Geographical information systems and science*. Wiley, Chichester, London.

Maciel, P. L. H.; S. Martín del C. y J. F. Villalpando. 1994. Caracterización agroclimática de Aguascalientes. Cuaderno de trabajo. Agricultura y Recursos Naturales. Publicación del Gobierno del Estado de Aguascalientes. 33 p.

Martínez, L. M.; Sandoval, J. y Guevara, R.D. 1991. El clima en la reserva de biósfera sierra de manantlan (Jalisco-Colima, México) y en su área de influencia. *Agrociencias serie Agua-Suelo- Clima*. 4(2):107-118.

Martínez, U. 2005. Riesgo de heladas para la agricultura e la región sureste del estado de coahuila. INIFAP. 66 pp.

MathWave. 2015. EasyFit. <http://www.mathwave.com/es/downloads.html>

- Matías R., L. G.; Fuentes M., O. A. y García J., F. 2001. Heladas. Serie Facículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. México, D. F. 35 p.
- Medina G., G.; Grageda G., J.; Ruiz C., J. A. y Báez G., A. D. 2008. Uso de estaciones meteorológicas en la agricultura. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campo Experimental Zacatecas, México. 19 p. (Folleto informativo No. 50).
- Monterubbianesi, M. G. y M. G. Cendoya. 2001. Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en Balcarce, Argentina, en el período 1970-1999. Rev. Fac. de Agronomía, 21(1): 69-78.
- Montgomery D. C. y G. C. Rungeer. 1996. Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería. México: McGraw- Hill/ Interamericana Editores, 173-189.
- Mota, F.S. 1981. Meteorología Agrícola. 5th ed. São Paulo, Brazil: Liv. Nobel.
- New, M. and Hulme, M. 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II. Development of 1901 monthly grids of terrestrial surface climate. J. Climatol. 13:2217-2238.
- Norero, A. 1991. Impacto de las heladas en la agricultura. Panorama Económico de la Agricultura (79): 27–35.
- Núñez, L. D.; Treviño, G. E. J.; Reyes, G. V. M.; Muñoz, R. C. A.; Aguirre, C. O. A. & Jiménez, P. J. 2014. Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5(2): 201-213.

- Ortiz, S. C. 2013. Elementos de agrometeorología cuantitativa. Universidad Autónoma Chapingo. Tercera Edición. Chapingo, México. 327 p.
- Pájaro H., D. y C.A. Ortiz S. 1989a. Estimación del período libre de heladas para la República Mexicana. En: Memorias de la II Reunión Nal. de Agroclimatología. UACH. Chapingo, Méx. Abril. pp. 103-125.
- Pájaro H., D. y C.A. Ortiz S. 1989b. Estimación del período de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la República Mexicana. En: Memorias de la II Reunión Nal. de Agroclimatología. UACH. Chapingo, Méx. Abril. pp. 145-163.
- Peralta, H. A. R. 1995. Caracterización Agroclimática del Estado de Aguascalientes. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Quaas Weppen, 2009, Building Geospacial Infrastructure in Support of Disaster Prevention and Management. UN, New York, August. Pp. 10-14.
- Reed, W. G. 1911. Frost in the United States 2nd. Pam American Scientific Congress. Proc. Vol. 2, 38 pp.
- Romo, G. y R. Arteaga. 1989. Meteorología agrícola. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Irrigación, México, 297- 372 pp.
- Ruiz C., J.A., Gonzalez A., I. J.; Regalado R., R.; Anguiano C., J.; Vizcaíno V., I. 2003b. Recursos edafo-climáticos para el sector productivo en el estado de Jalisco. Libro Técnico Núm. 2. INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. 278 p.
- Ruiz C. J. A.; Medina G., G.; Ortiz T., C.; González A., I. J.; Flores L., H. E.; Martínez P., R. A. y Byerly M, K. F. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jal., Méx. 324 p.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo agrícola Experimental Valle de México. Chapingo, México.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, 1982. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del campo agrícola experimental Tecamachalco. CAETECA, Puebla, México.

Servicio de información agroalimentaria y pesquera. 2009. <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Estadisticas/Documents/PUEBLA.pdf>

Servicio de información agroalimentaria y pesquera. 2009. <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Estadisticas/Documents/Tlaxcala.pdf>

Serrano A., V.; López L., A.; Medina G., G.; Cano G., M. A.; Díaz P., G. y Ruiz C., A. 2007. Caracterización espacio-temporal de la precipitación mensual y humedad disponible en el estado de Oaxaca. INIFAP-CIRPAS-CEVCO: Libro Técnico No. 8. Etna, Oaxaca, México. 185 p.

SIGA, 2010. <http://siga.cna.gob.mx/MDE3D/DEM3D.aspx>.

Silva, G. A. 2002. Clasificación de pisos térmicos en Venezuela. Revista Geográfica Venezolana. 43(2):311-328.

Straschnoy, J. V.; Di Bella, C. M.; Jaimes, F. R.; Oricchio, P. A. y Rebella, C. M. 2006. Caracterización espacial del estrés hídrico y de las heladas en la región pampeana a partir de información satelital y complementaria. RIA, 35 (2): 117-141.

Subgerencia de Información Geográfica del Agua. 2010.
<http://siga.cna.gob.mx/cartografia.aspx>

Torres R., E. 1983. Agrometeorología. Editorial Diana, S.A. Primera Edición. México. 149 p.

Torres E. 1995. Agrometeorología. México: Editorial Trillas, 154 pp.

Ventskevich, G. Z. 1961. Agrometeorology (Translated from Russian). Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem. 300 p.

Vilatte, C.; Navarro Dujmovich, M.; Confalone, A.; Aguas, L. 2008. Análisis de las heladas de 2007 en la zona centro del partido de Azul, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. XXII Reunión Argentina de Agrometeorología. San Salvador de Jujuy – Argentina.

Villalpando I., J. F. y E. García. 1993. Agroclimatología del Estado de Jalisco. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Laboratorio Bosque La Primavera. Guadalajara, Jal. 40 p. y anexo cartográfico.

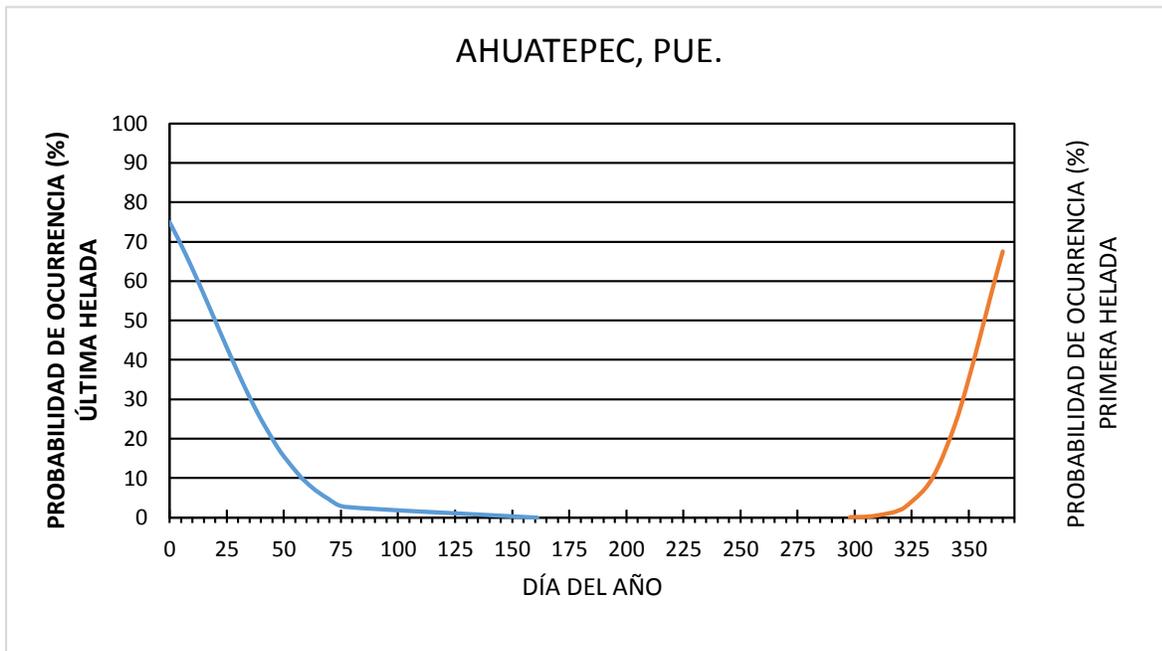
Villalpando I., J. F.; B. C. Biswas; A. Coulibaly; Z. Gat; B. S. Lomoton; K. B. Perry and E. S. Ulanova. 1991. Practical use of agrometeorological data and information for planning and operational activities in all aspects of agriculture, including farming systems. WMO. Commission for Agricultural Meteorology. Geneva. 131 p.

Villaseca, S., R. Novoa y J. Carrasco. 1992. Las heladas y su importancia en la agricultura. Investigación y Progreso Agropecuario La Platina (70): 38-43.

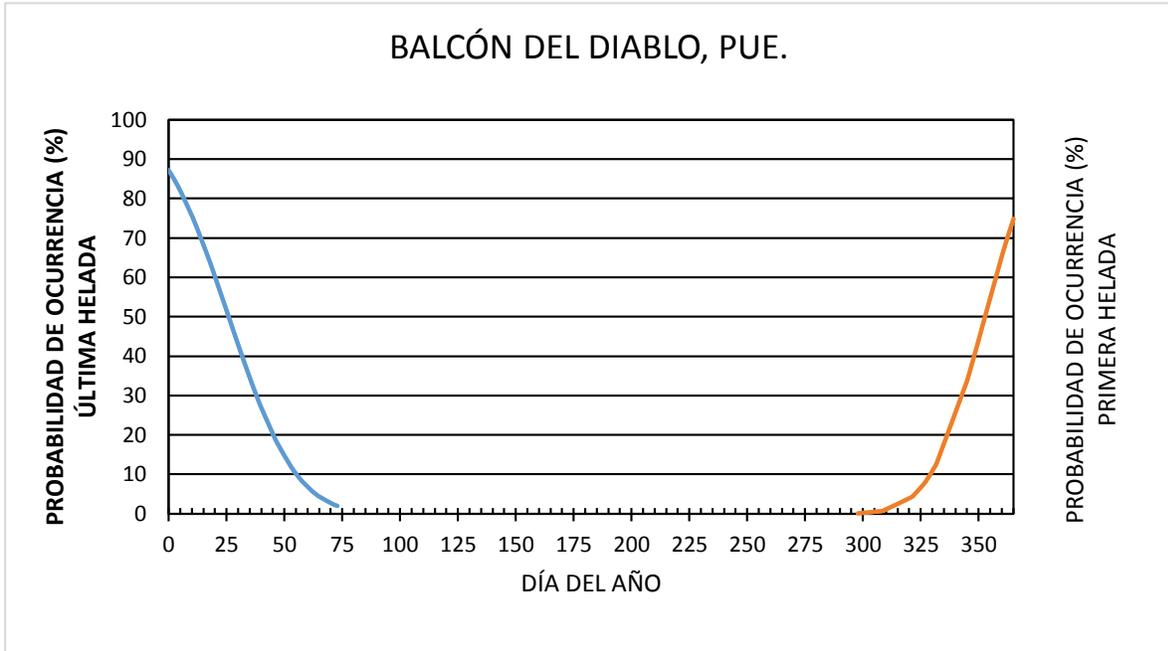
Villatoro, M.; Henríquez, C. y Sancho, F. 2008. Comparación de interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE y P del suelo. Agronomía Costarricense 32(1):95-105.

X. ANEXOS

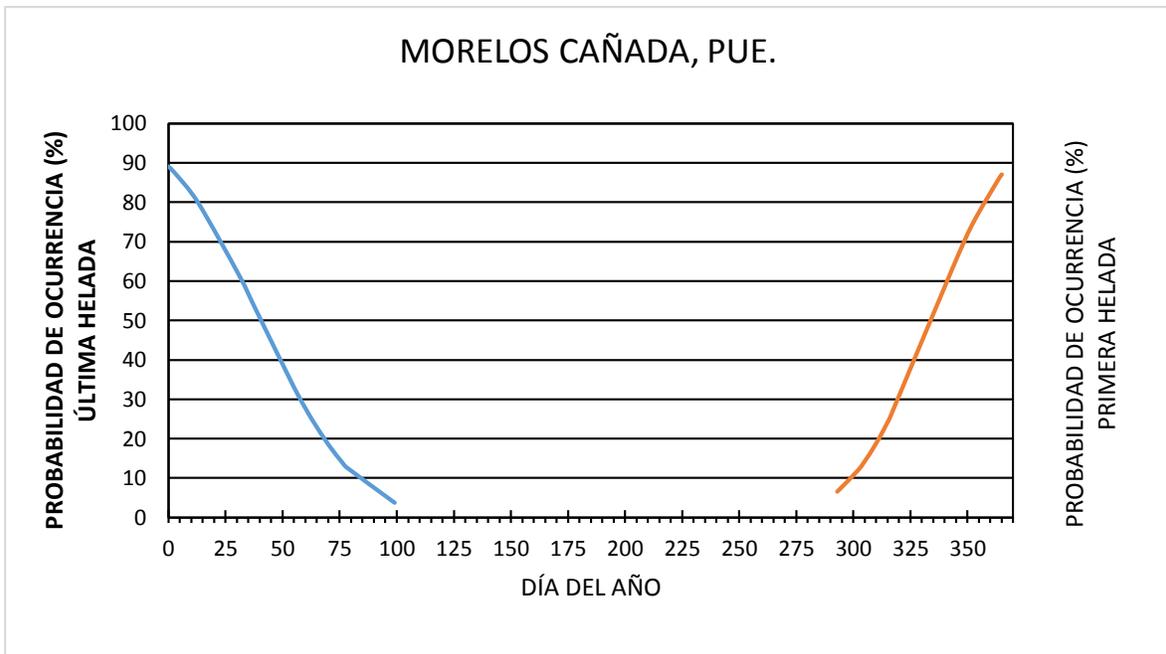
ANEXO A: Gráficas de probabilidad de la primera y última helada y periodo libre de heladas.



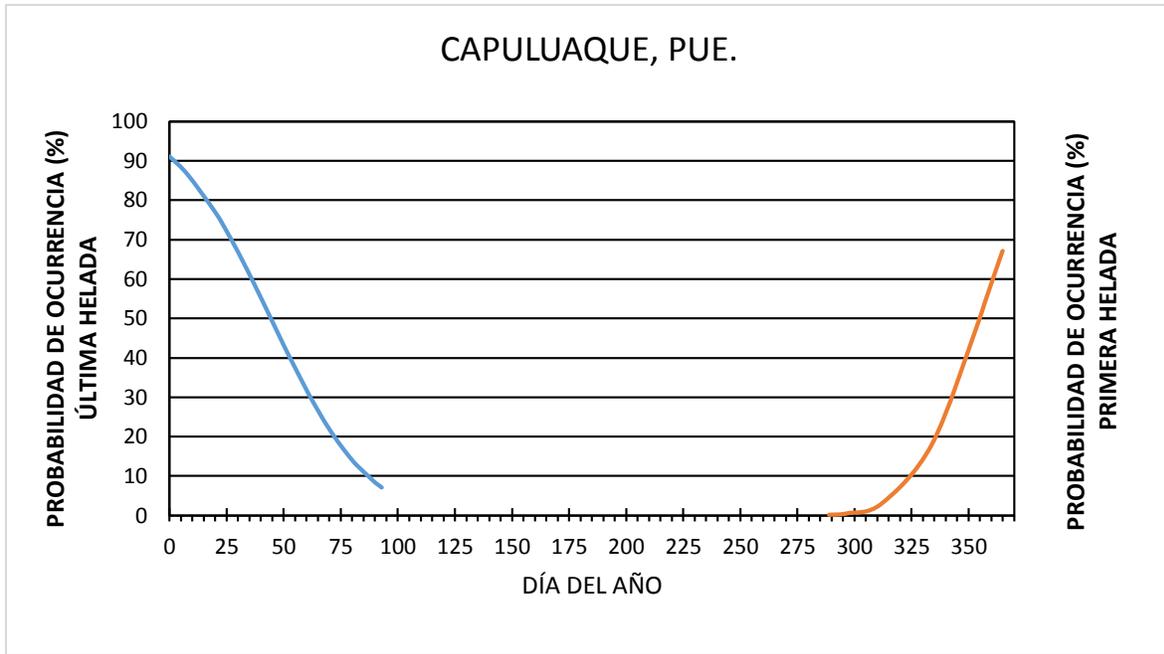
Anexo A-1. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Ahuatepec, Puebla.



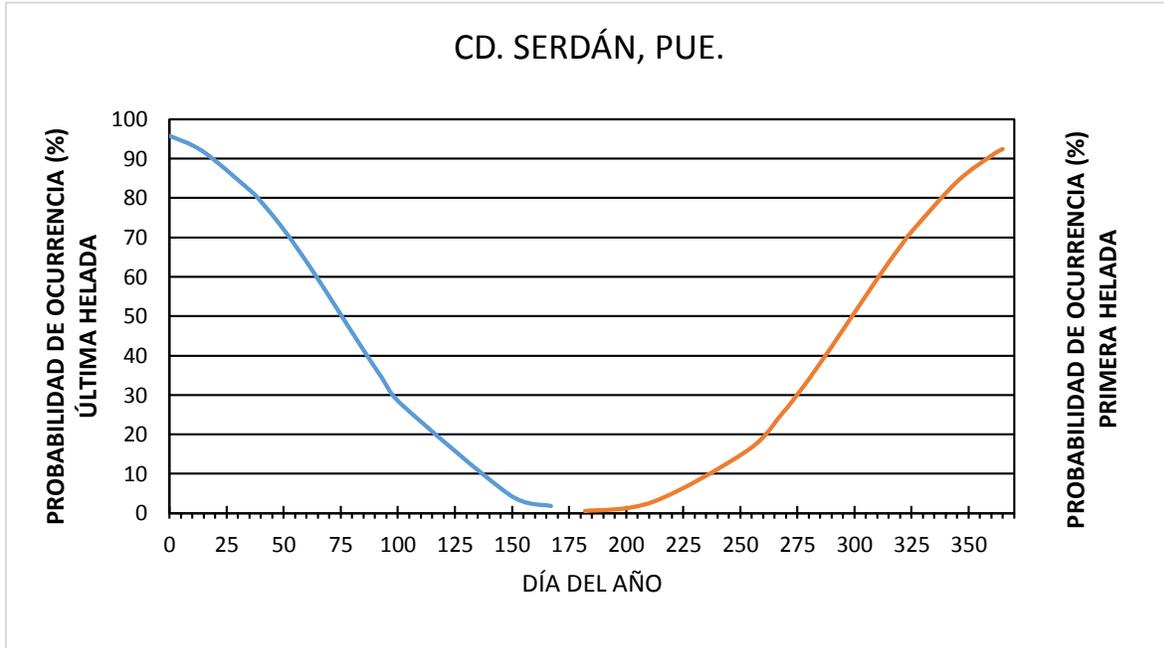
Anexo A-2. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Balcón del Diablo, Puebla.



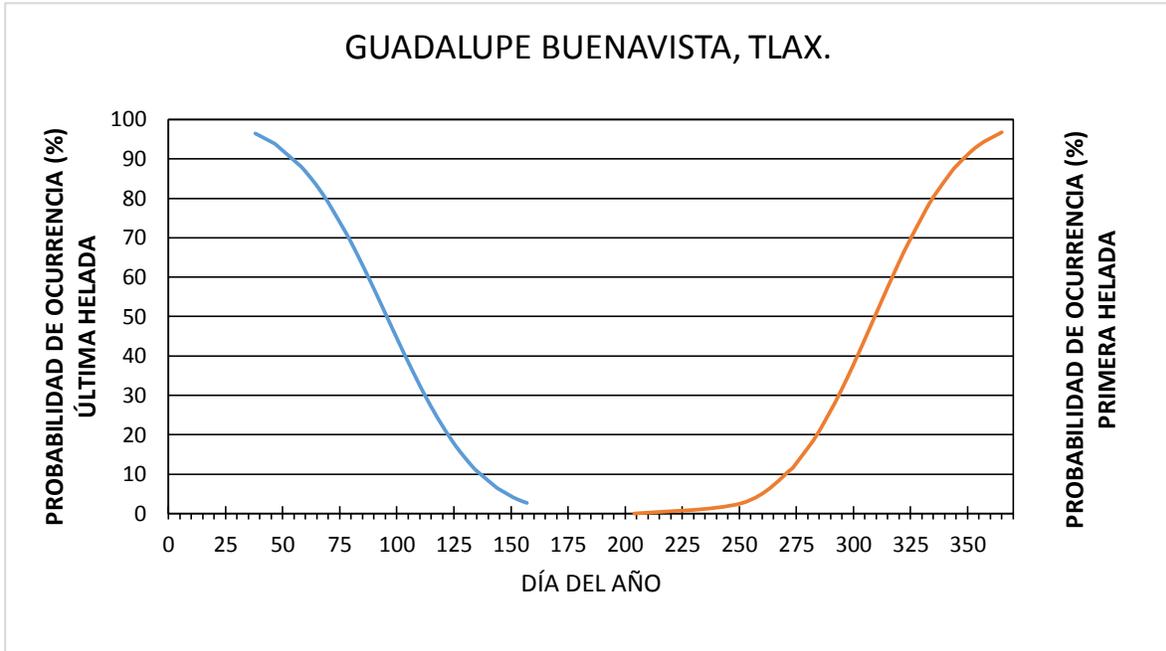
Anexo A-3. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Morelos Cañada, Puebla.



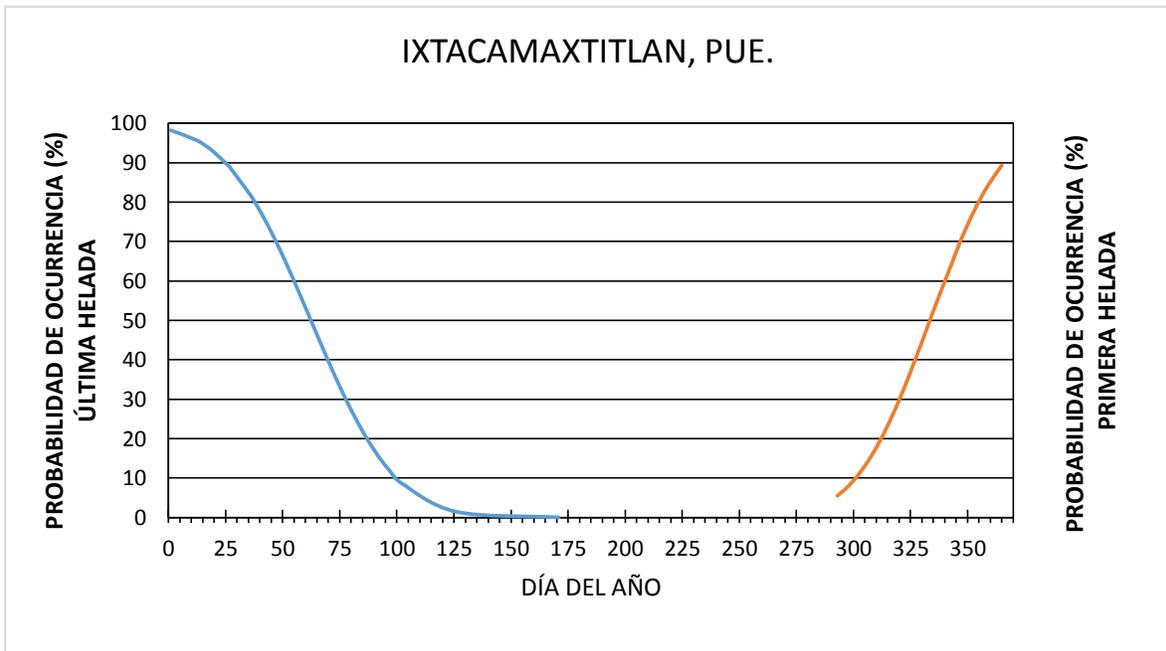
Anexo A-4. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Capuluaque, Puebla.



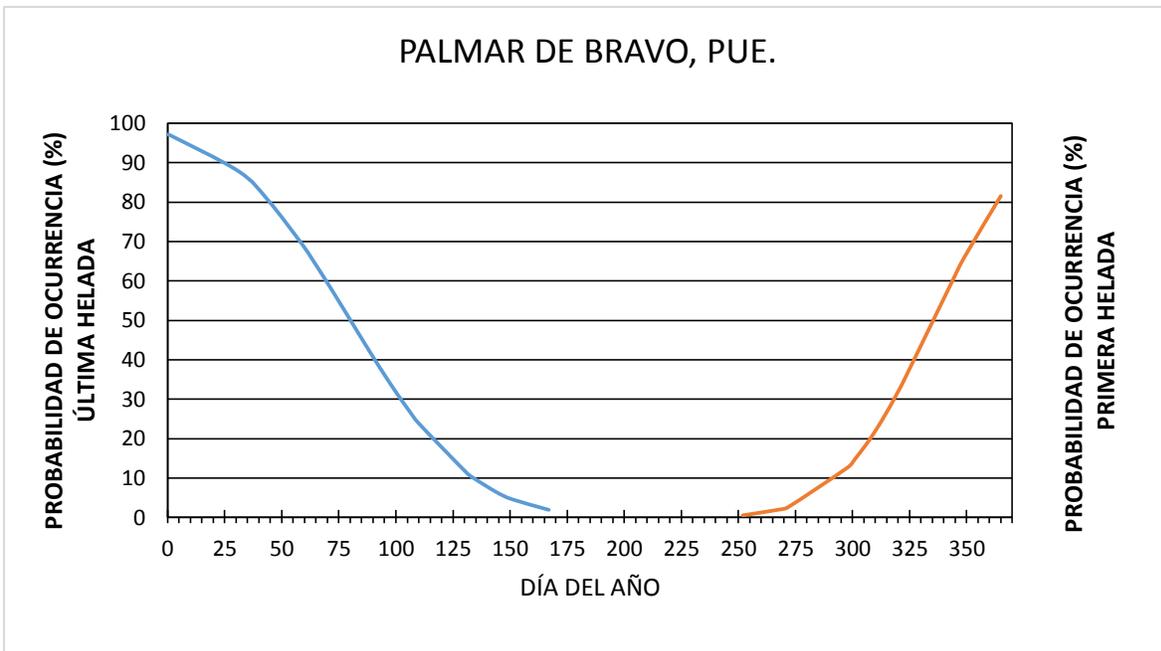
Anexo A-5. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Cd. Serdán, Puebla.



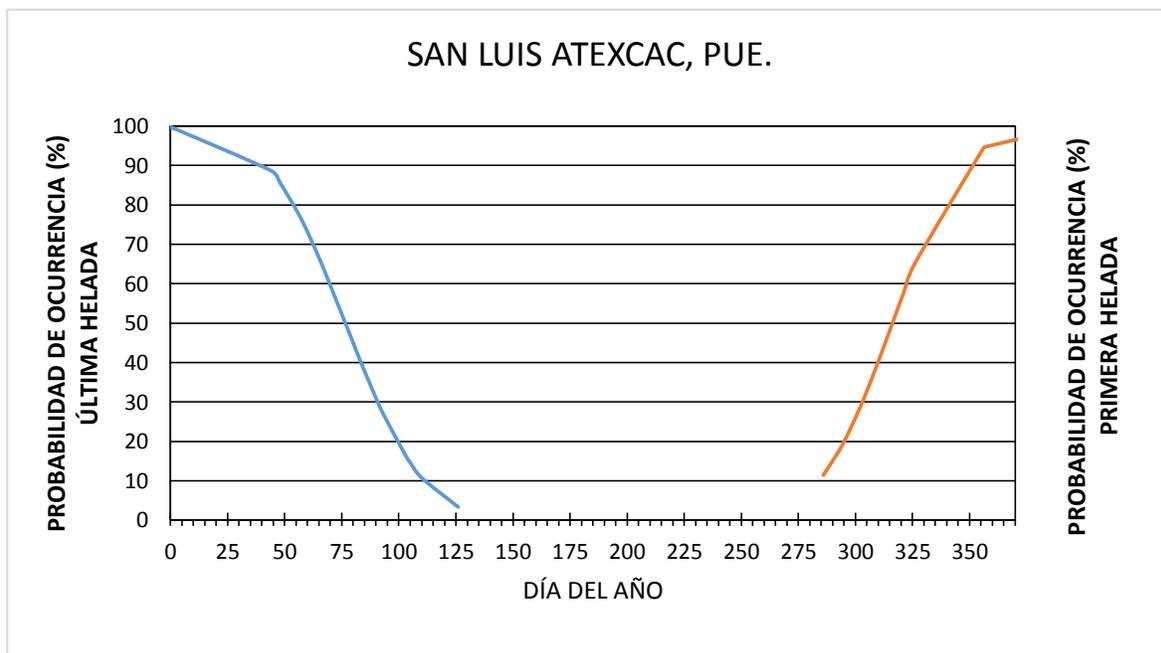
Anexo A-6. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Guadalupe Buenavista, Puebla.



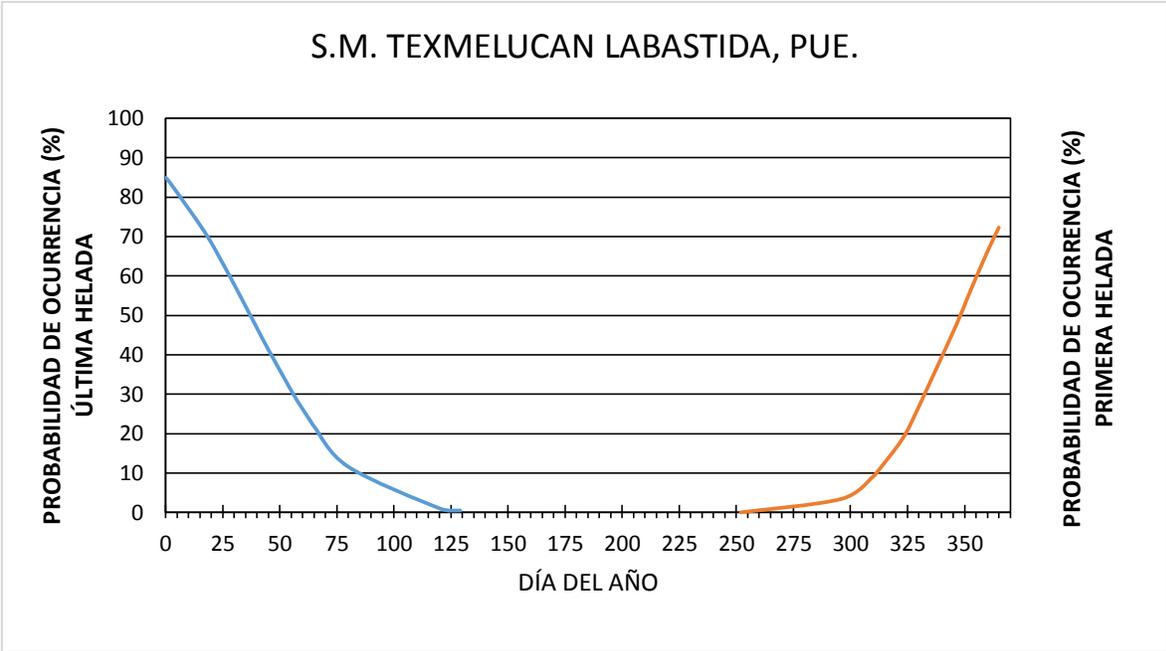
Anexo A-7. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Ixtacamaxtitlán, Puebla.



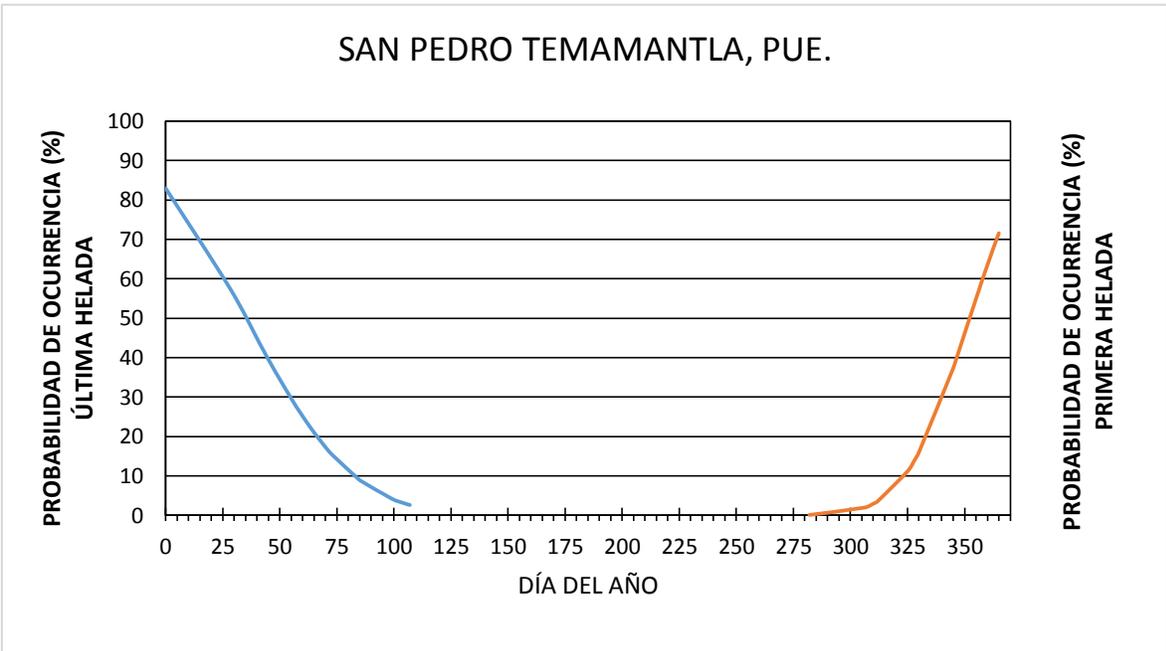
Anexo A-8. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Palmar de Bravo, Puebla.



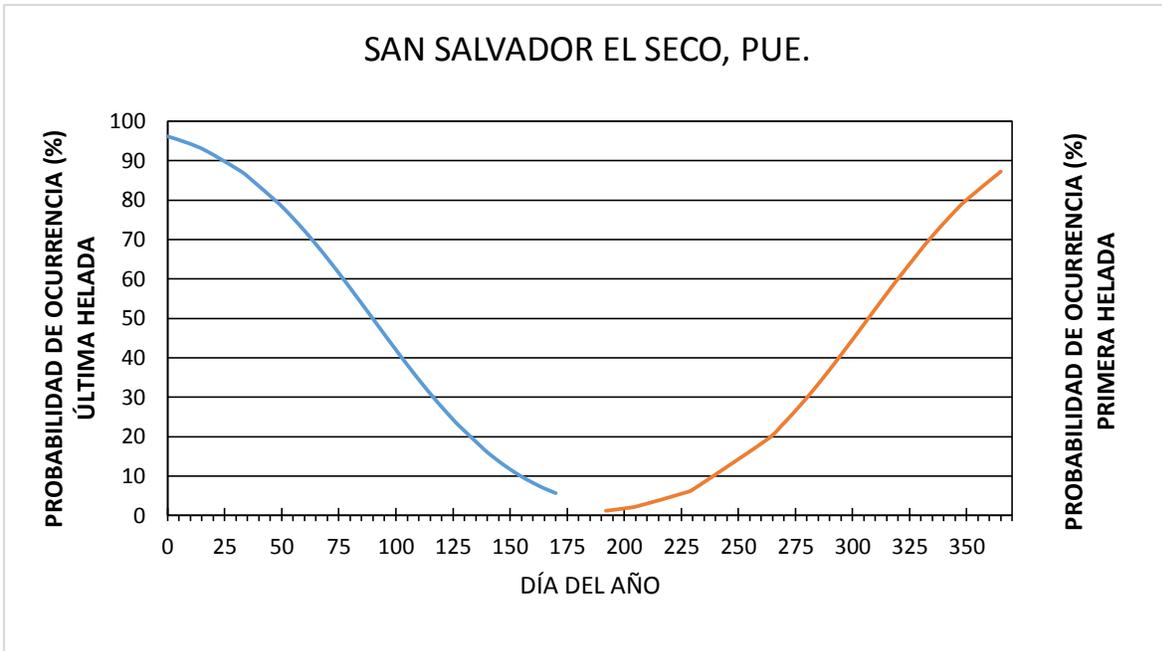
Anexo A-9. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Luis Atexcac, Puebla.



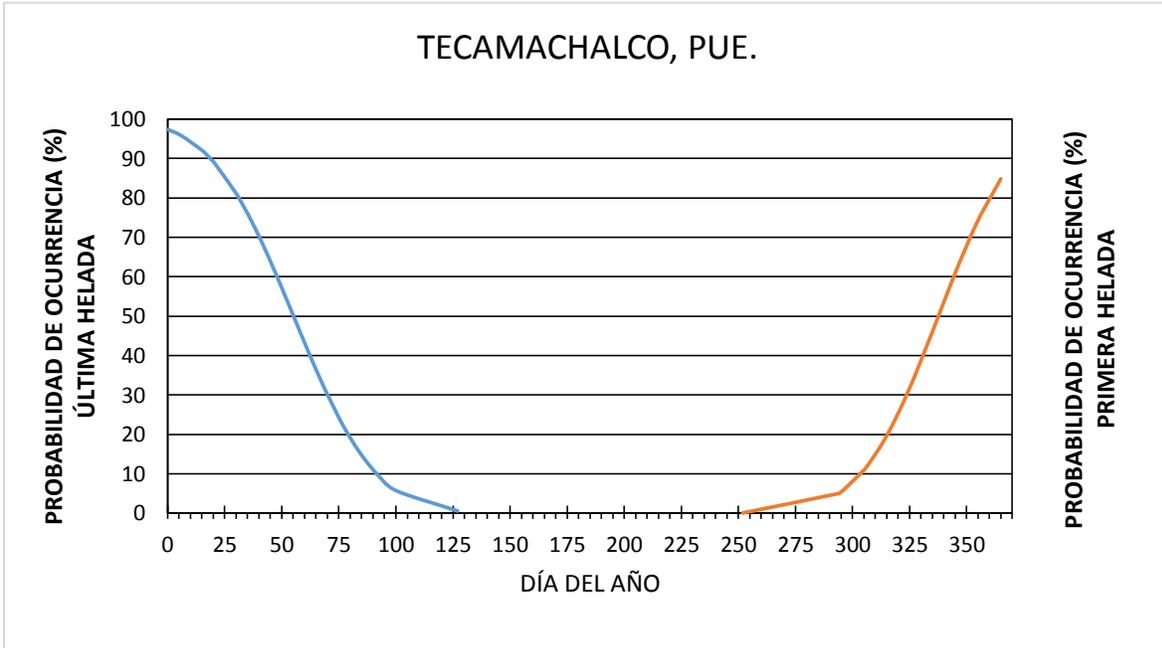
Anexo A-10. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Martín Texmelucan Labastida, Puebla.



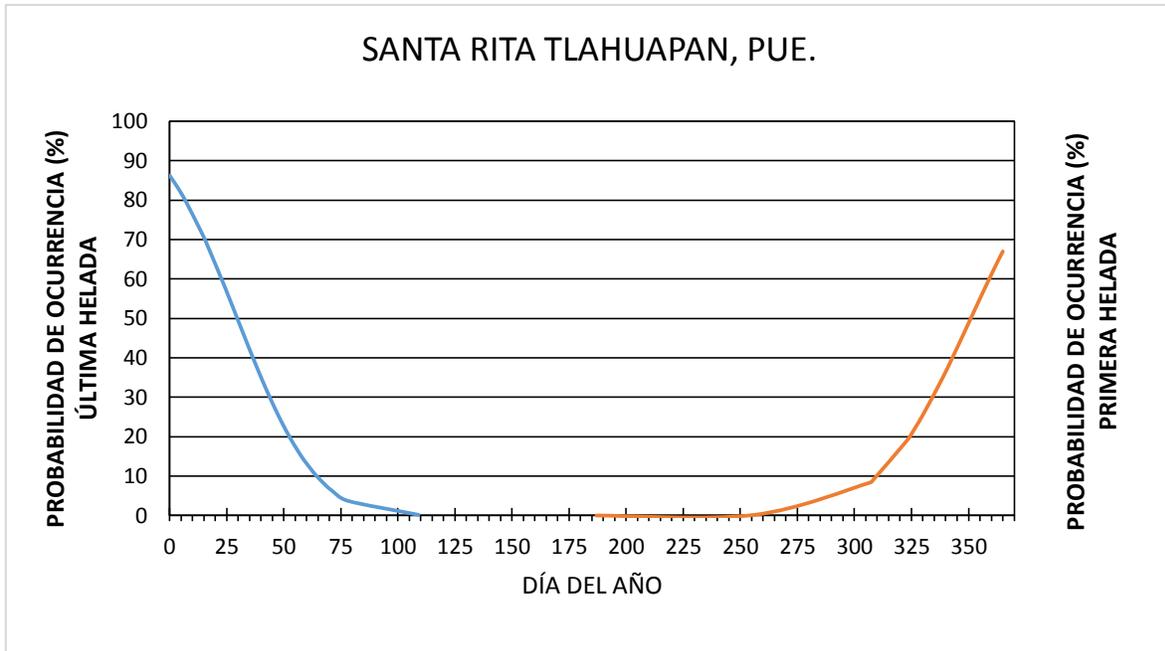
Anexo A-11. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Pedro Temamantla, Puebla.



Anexo A-12. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Salvador el Seco, Puebla.



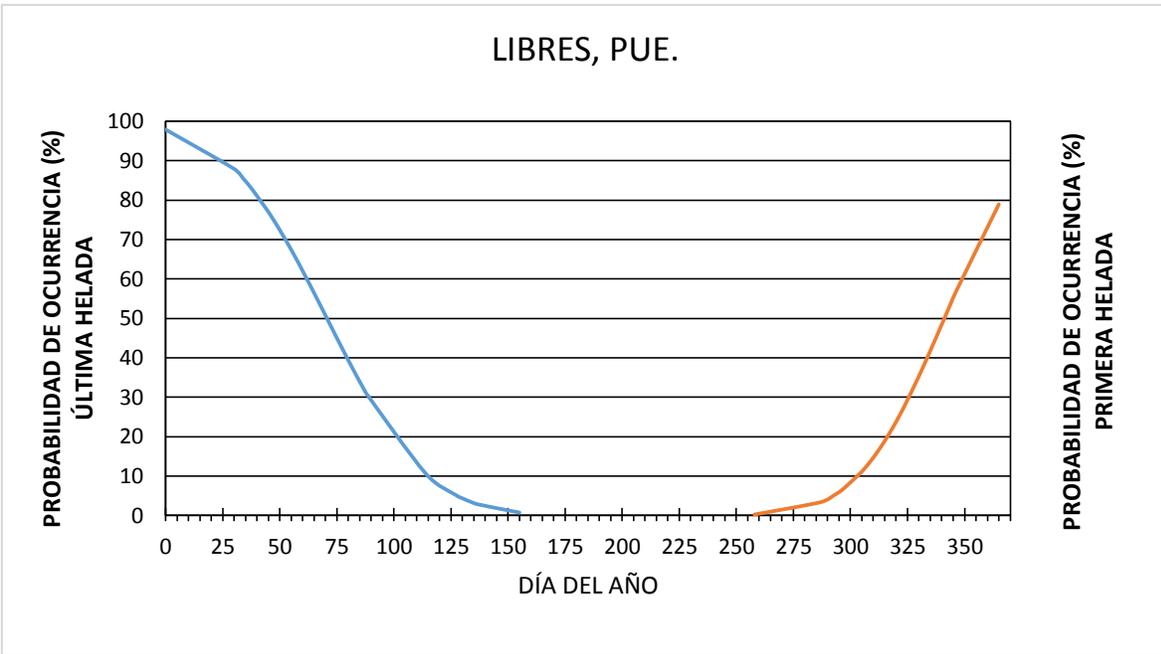
Anexo A-13. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Tecamachalco, Puebla.



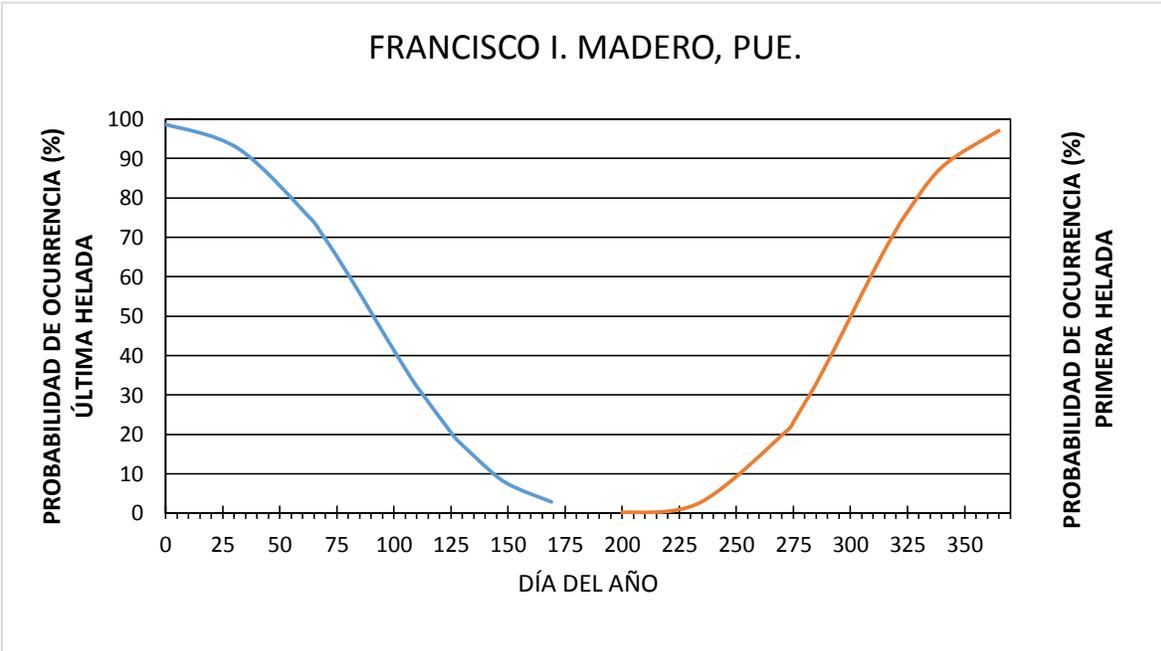
Anexo A-14. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa Rita Tlahuapan, Puebla.



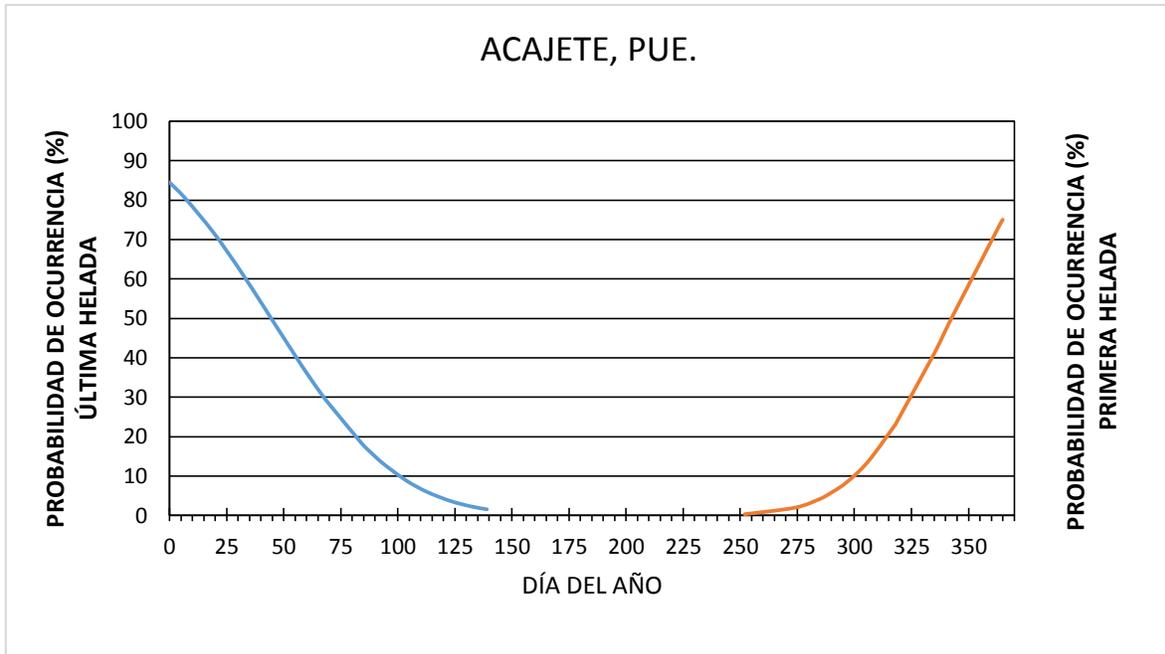
Anexo A-15. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Guadalupe Victoria, Puebla.



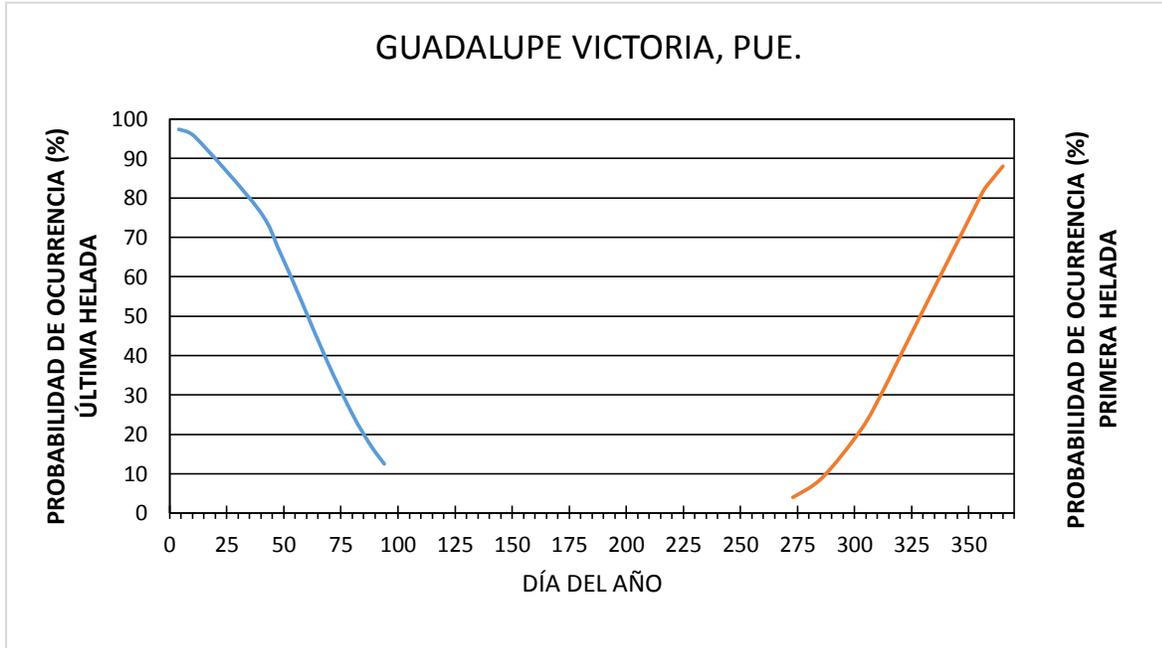
Anexo A-16. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Libres, Puebla.



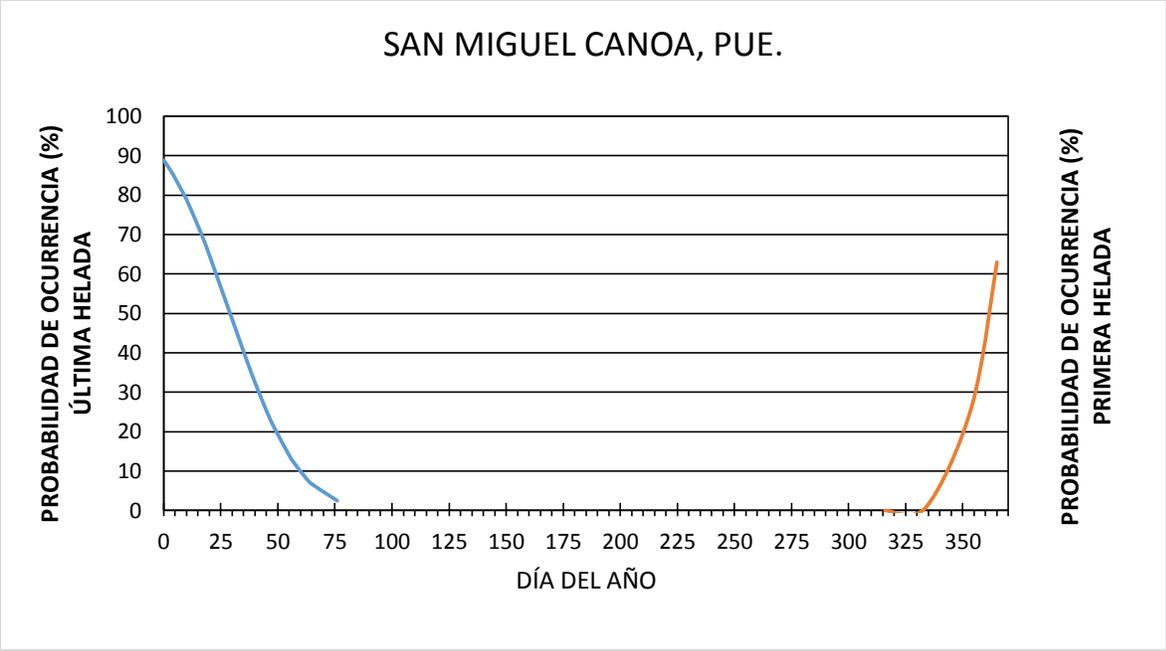
Anexo A-17. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Francisco I. Madero, Puebla.



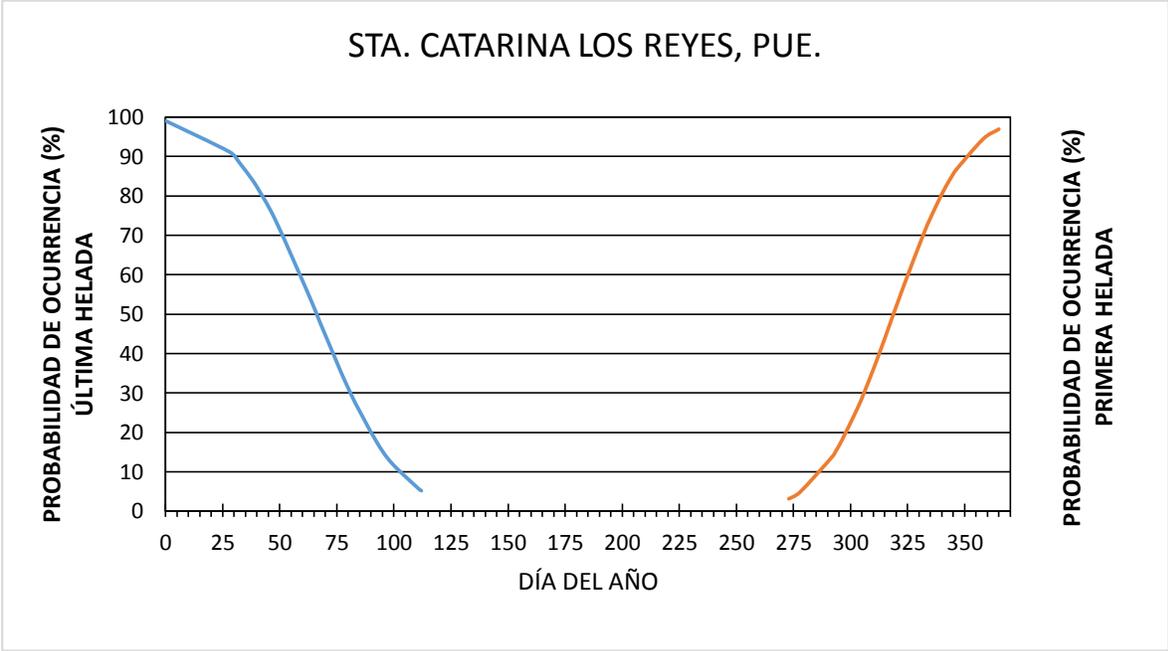
Anexo A-18. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Acajete, Puebla.



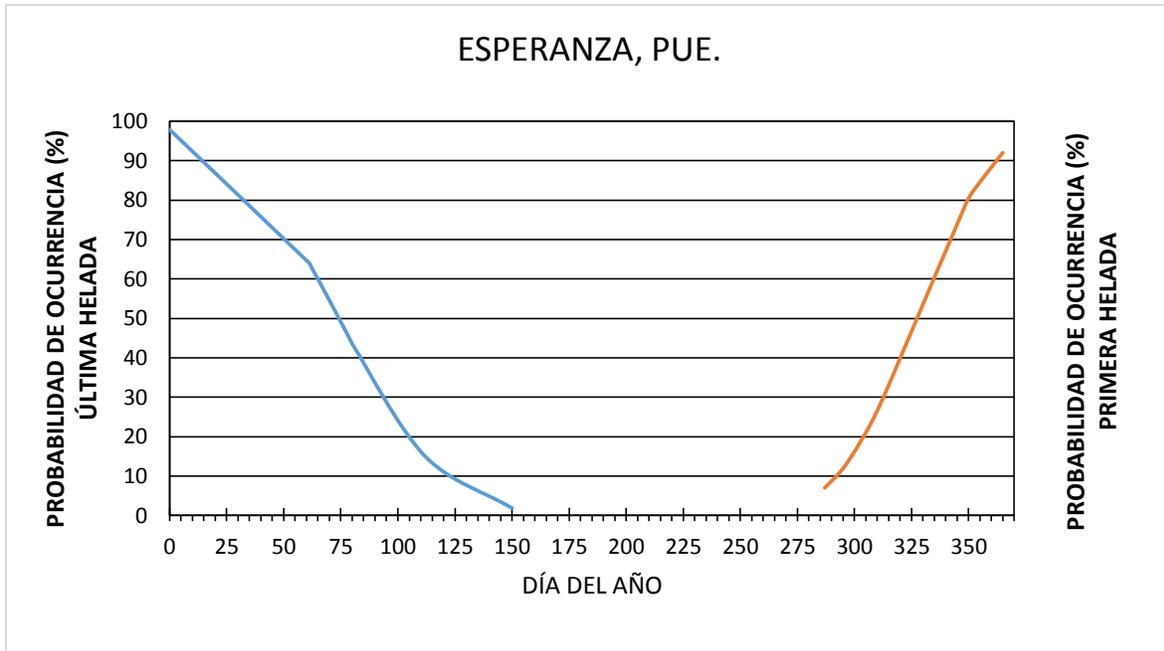
Anexo A-19. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Guadalupe Victoria, Puebla.



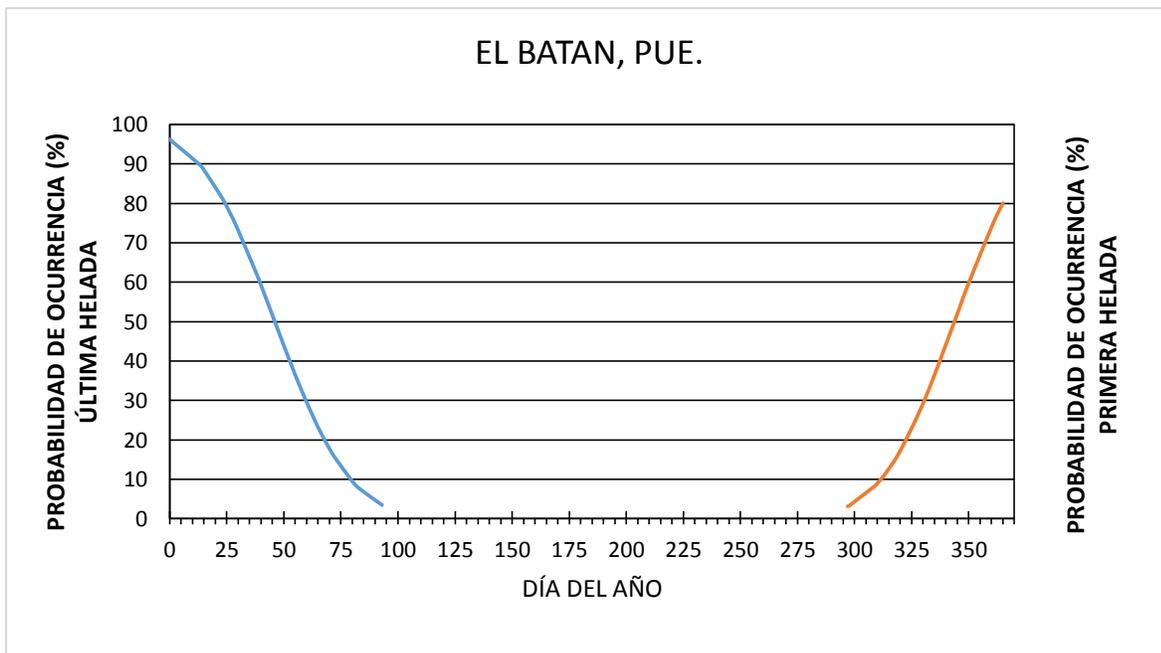
Anexo A-20. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Miguel Canoa, Puebla.



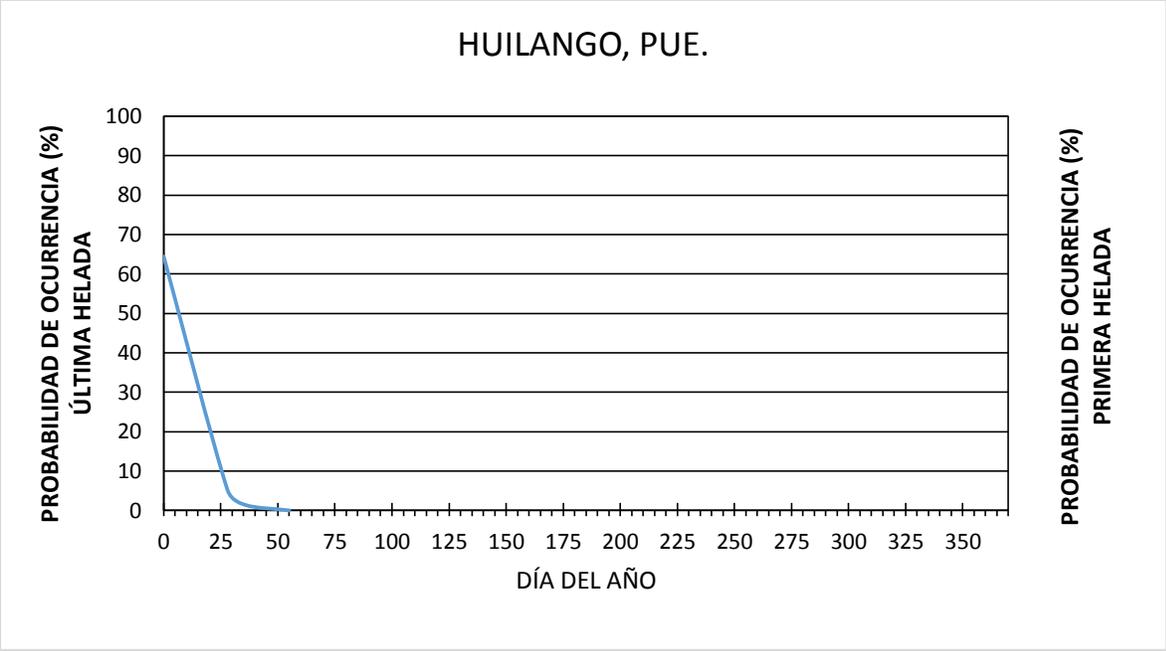
Anexo A-21. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Santa Catarina los Reyes, Puebla.



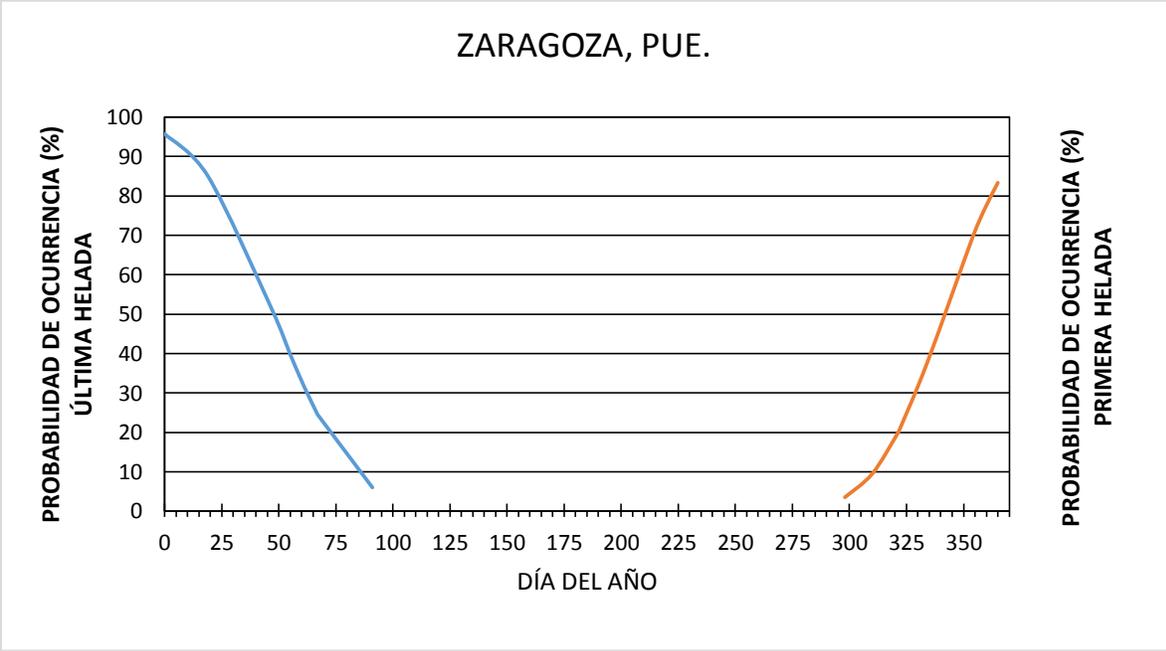
Anexo A-22. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Esperanza, Puebla.



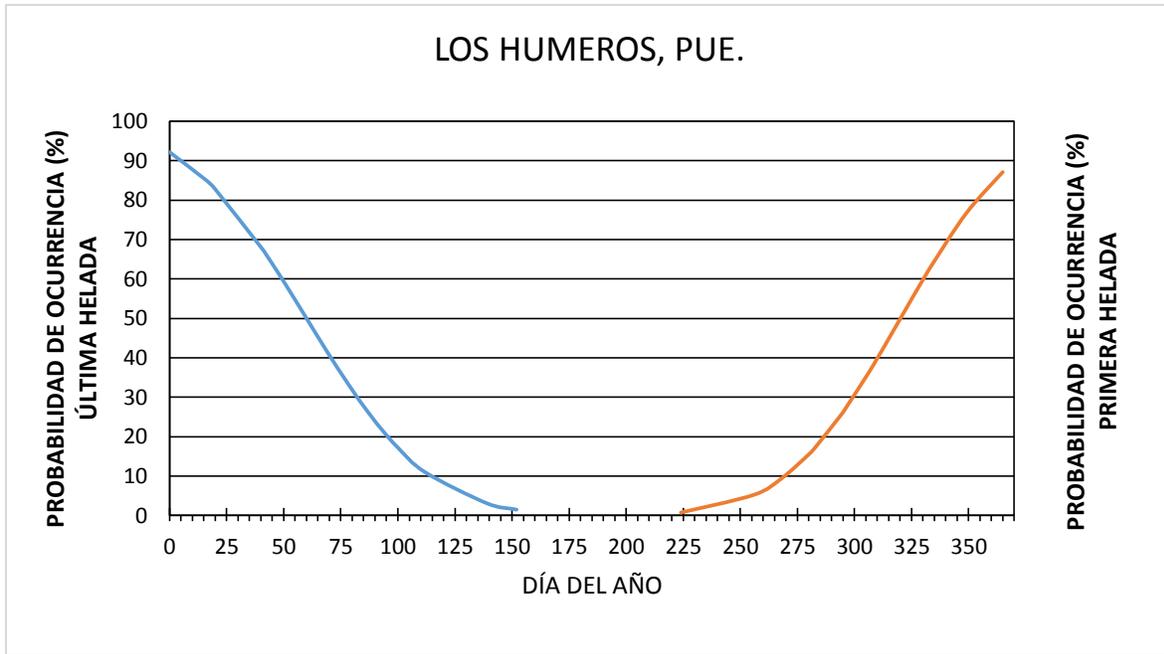
Anexo A-23. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación El Batán, Puebla.



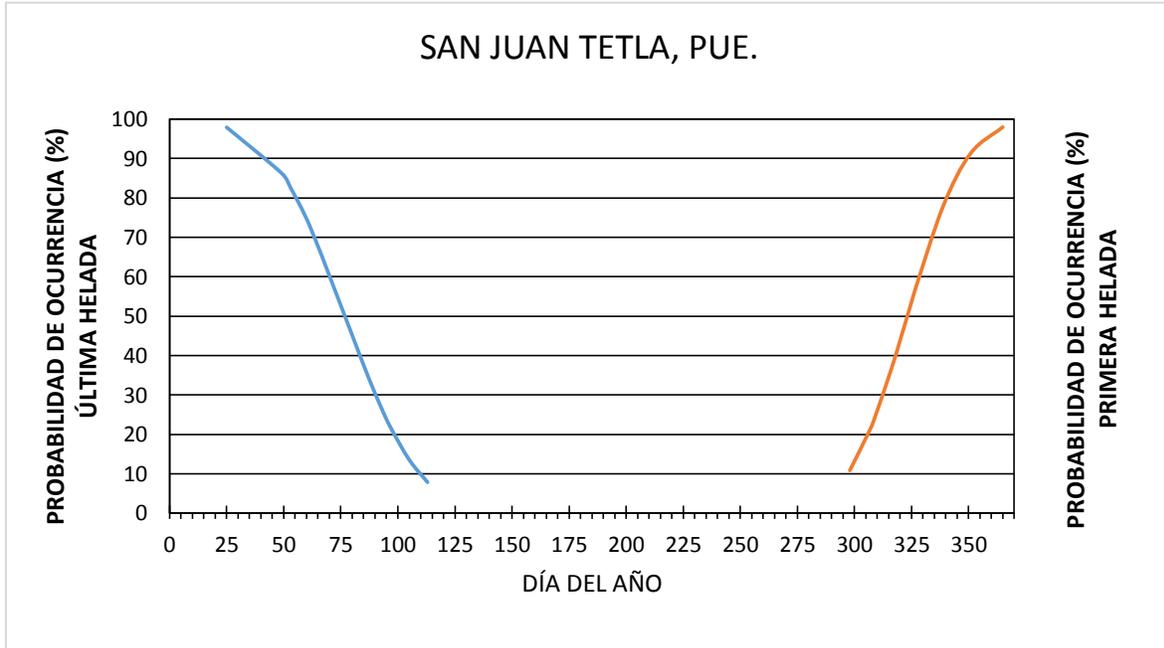
Anexo A-24. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Huilango, Puebla.



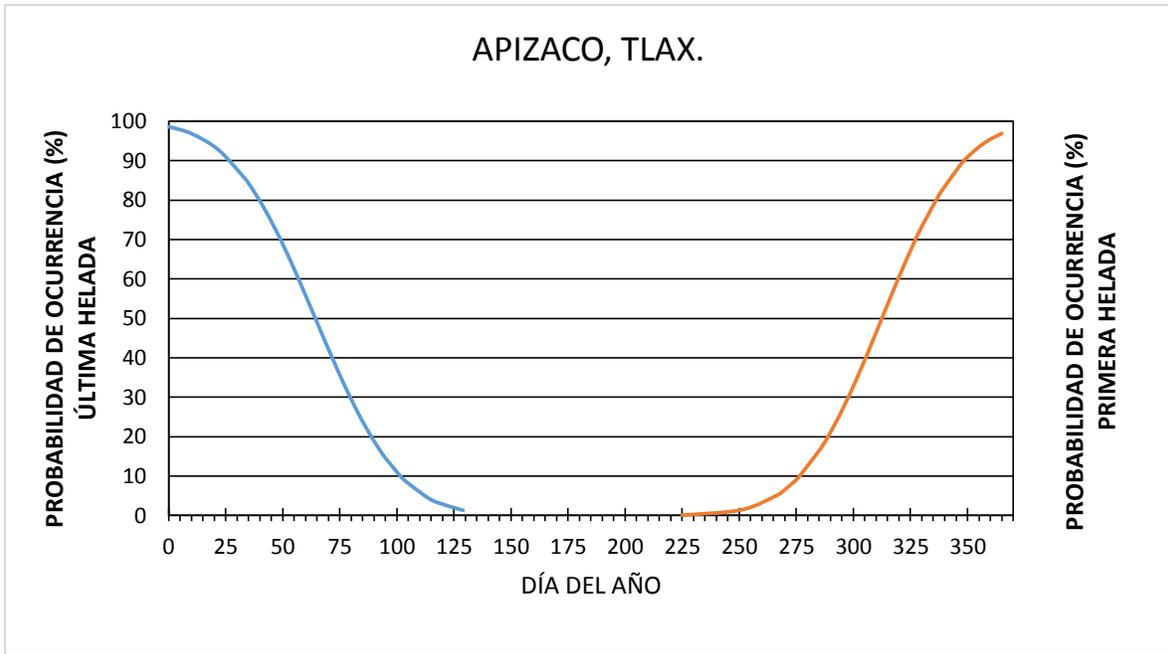
Anexo A-25. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Zaragoza, Puebla.



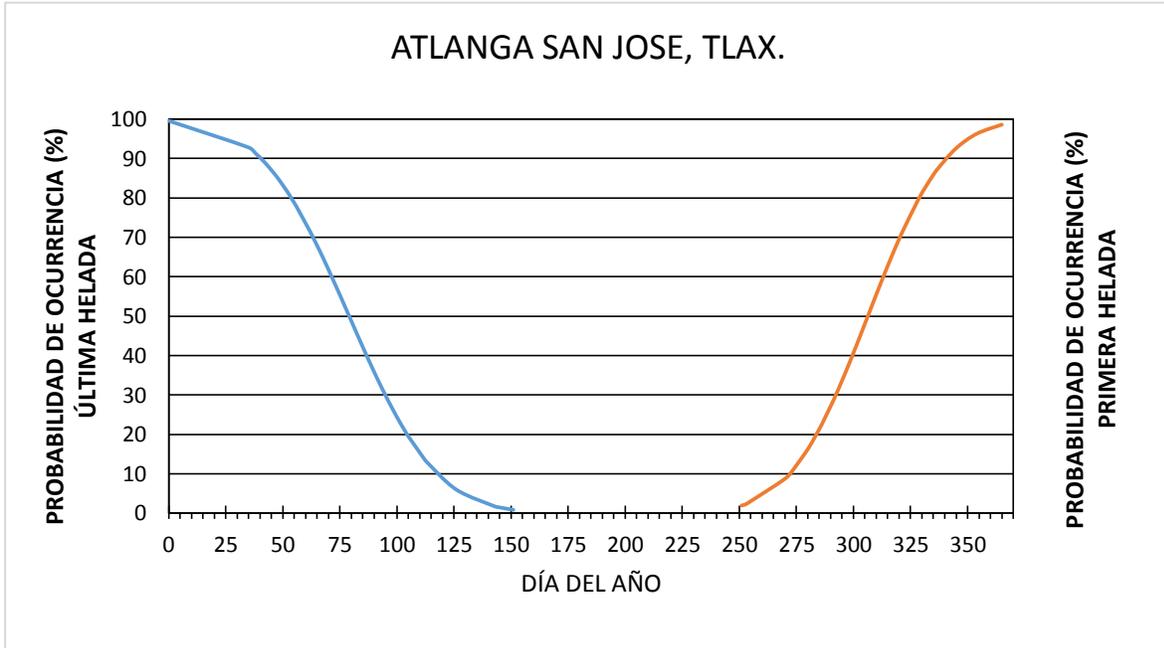
Anexo A-26. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Los Humeros, Puebla.



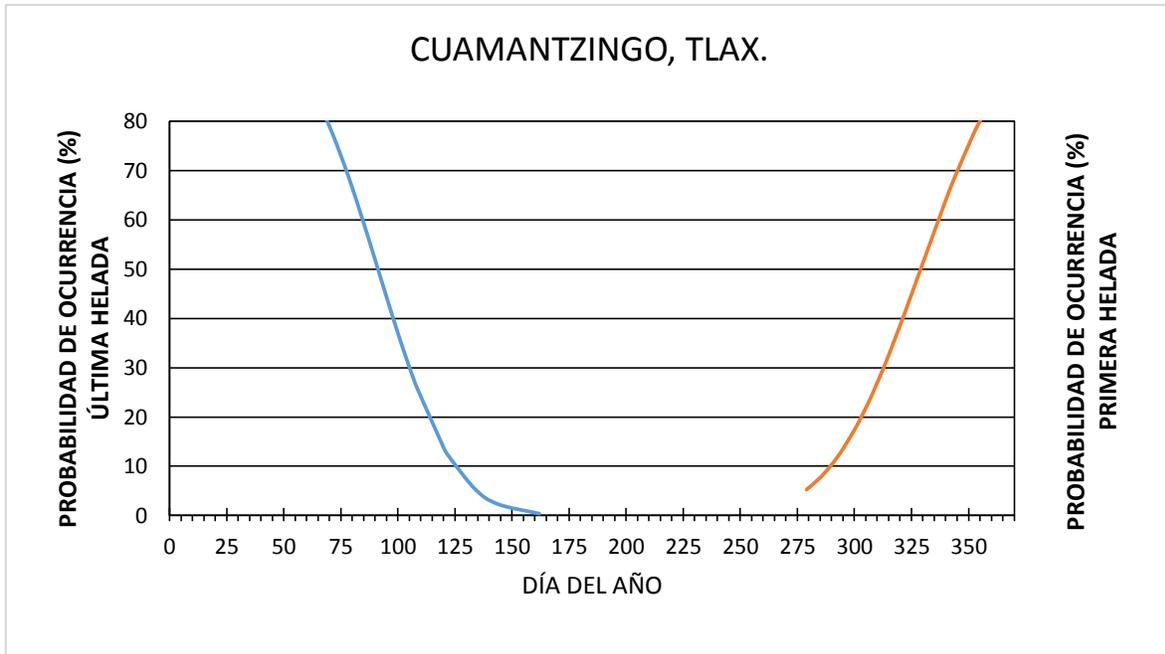
Anexo A-27. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Juan Tetla, Puebla.



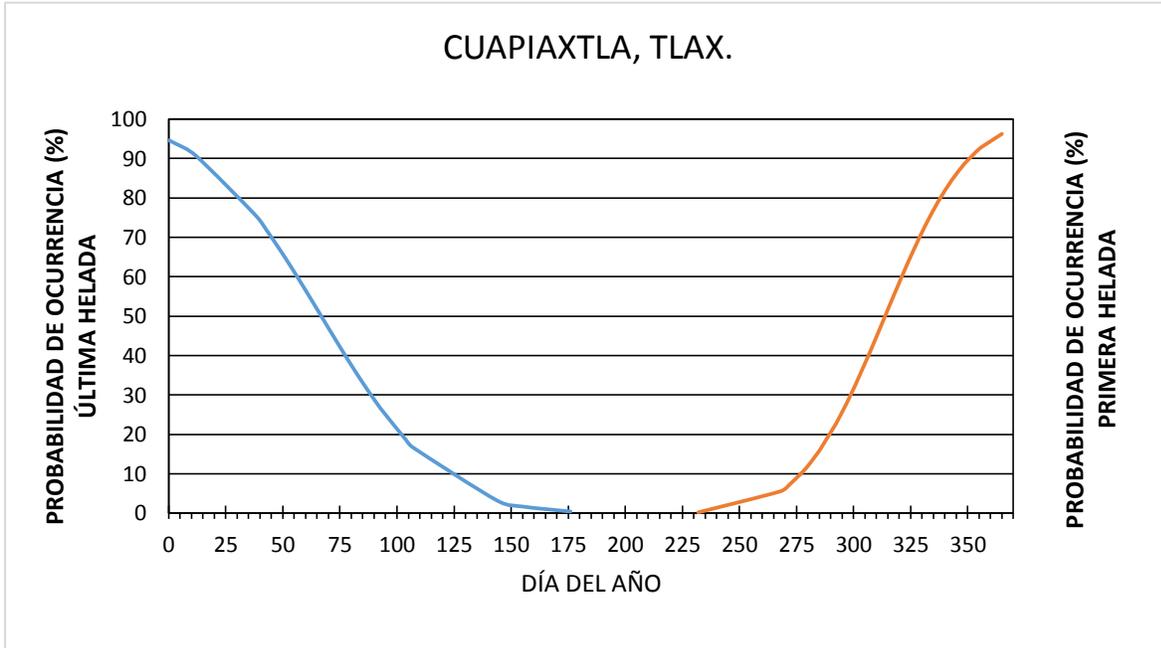
Anexo A-28. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Apizaco, Tlaxcala.



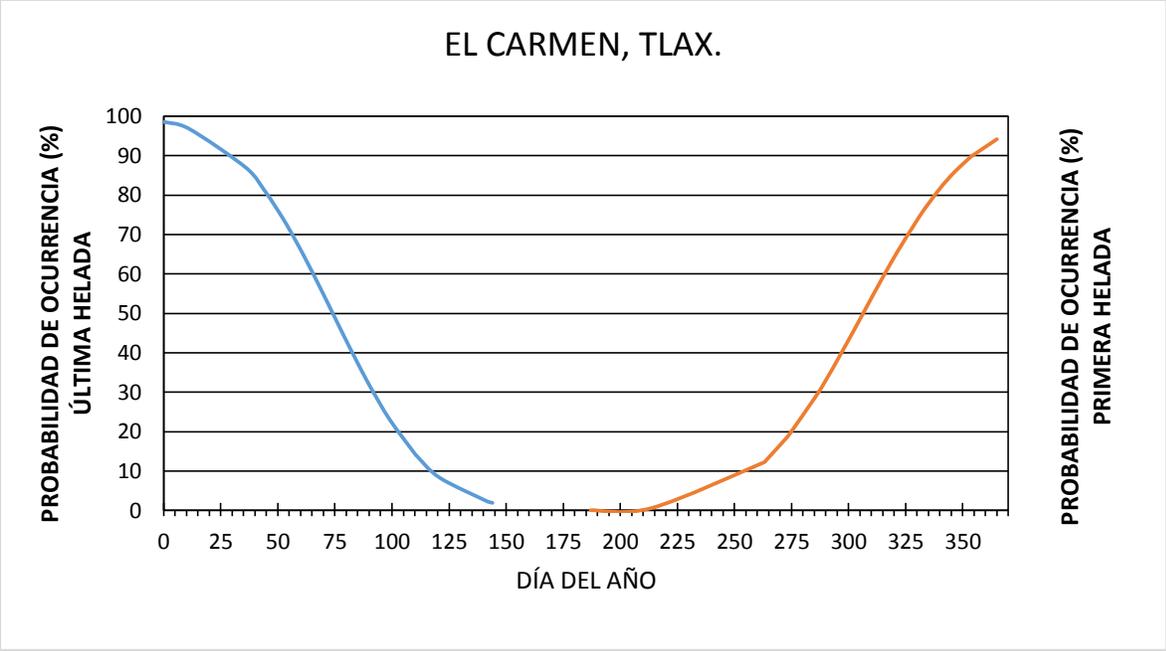
Anexo A-29. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Atlanga San José, Tlaxcala.



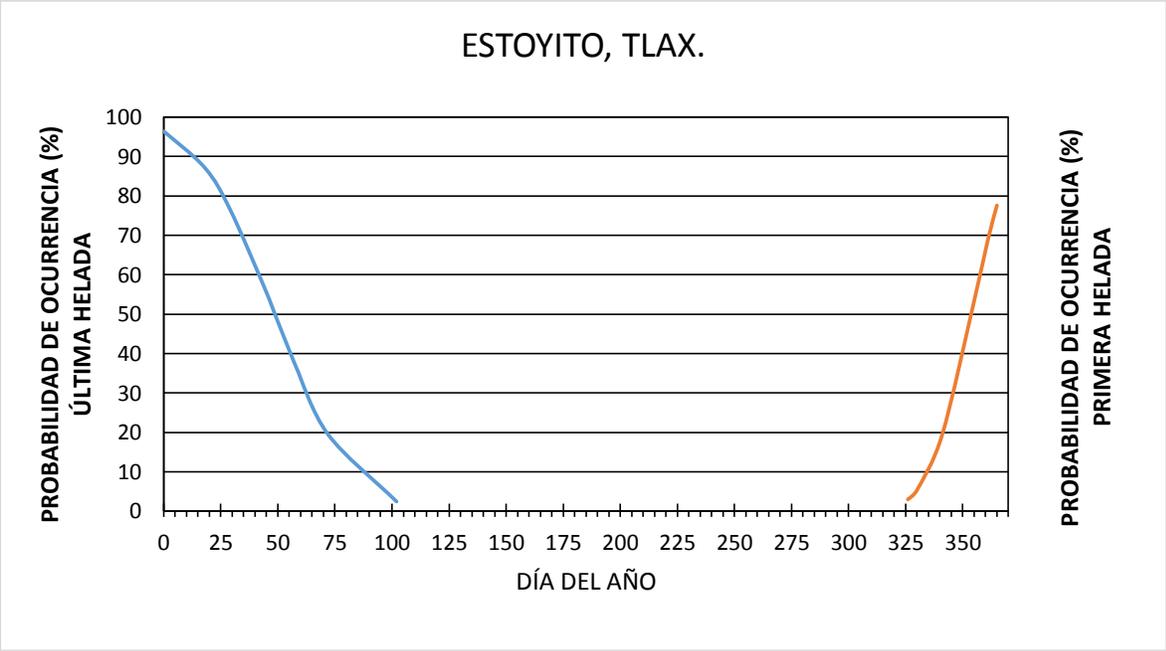
Anexo A-30. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Cuamantzingo, Tlaxcala.



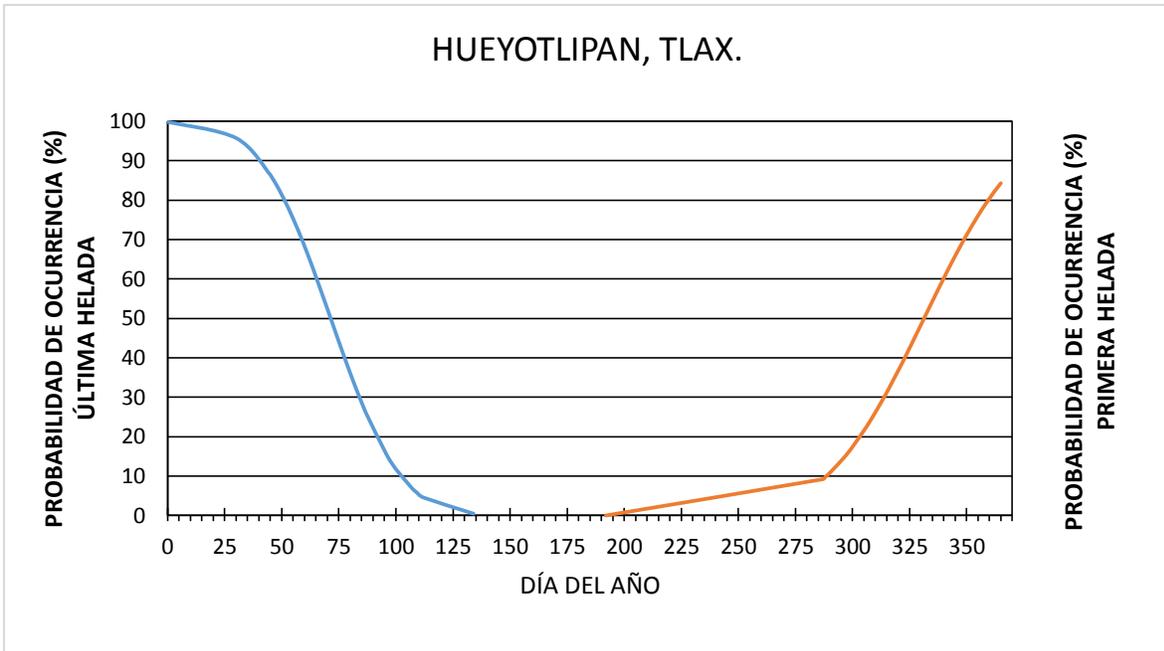
Anexo A-31. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Cuapiaxtla, Tlaxcala.



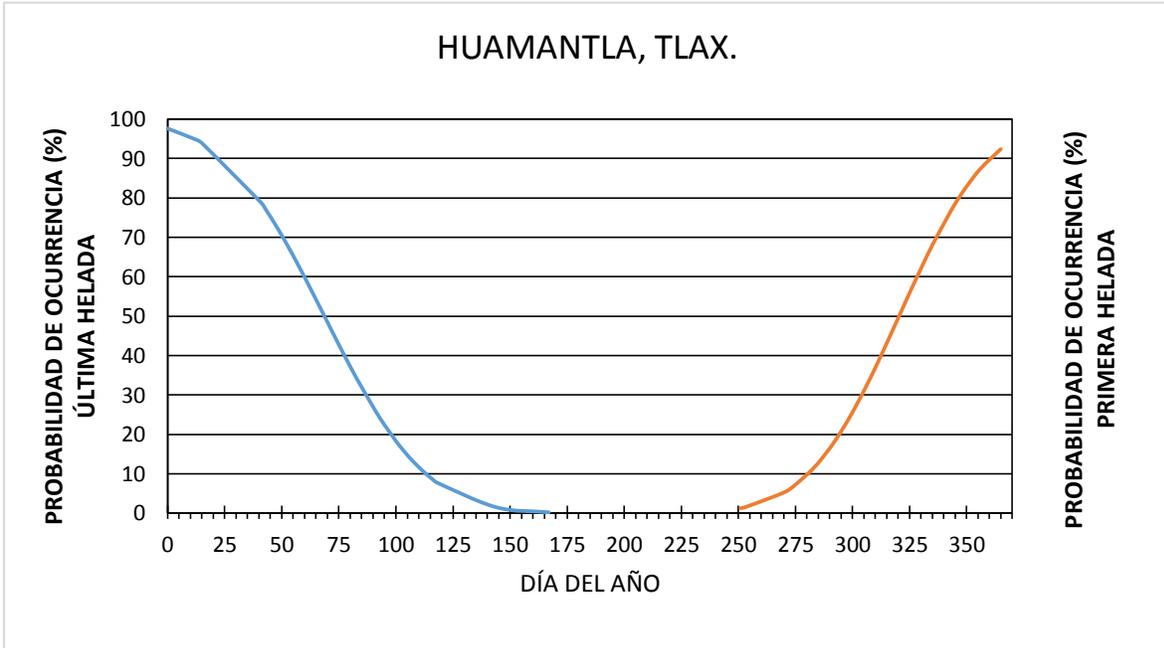
Anexo A-32. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación El Carmen, Tlaxcala.



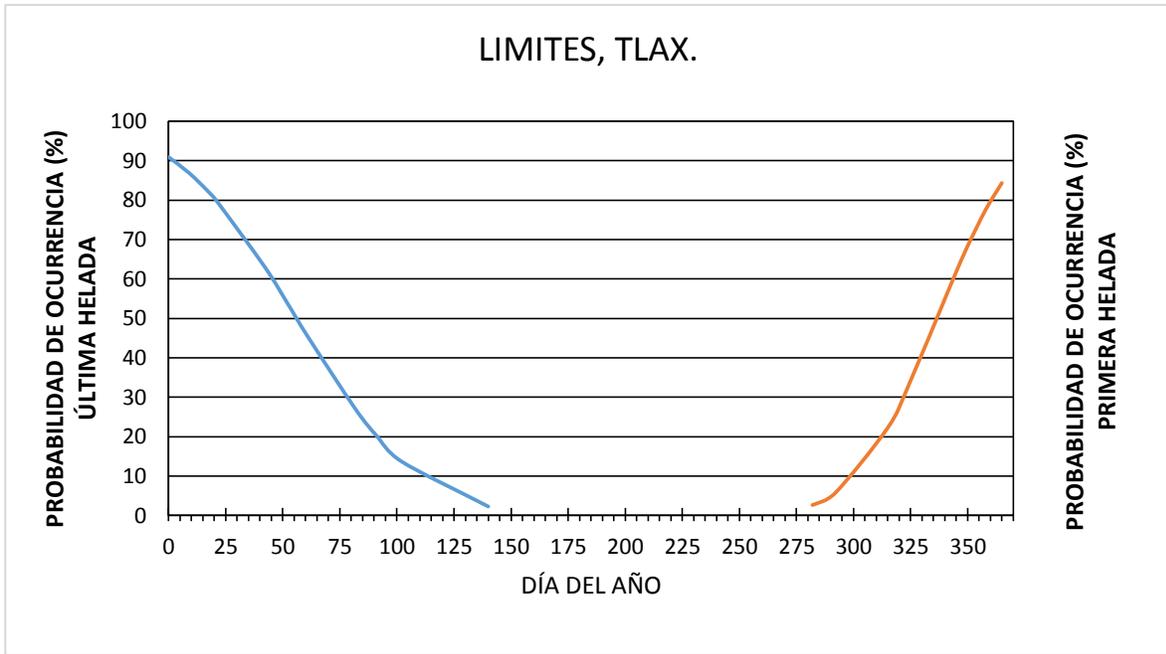
Anexo A-33. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Estoyito, Tlaxcala.



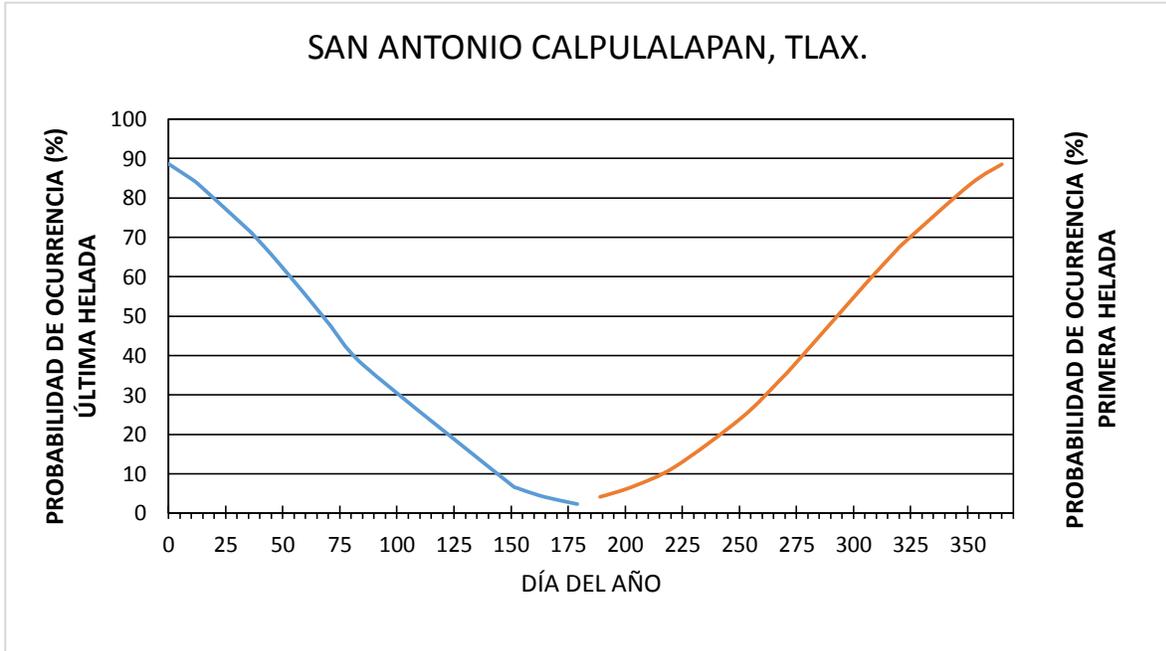
Anexo A-34. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Hueyotlipan, Tlaxcala.



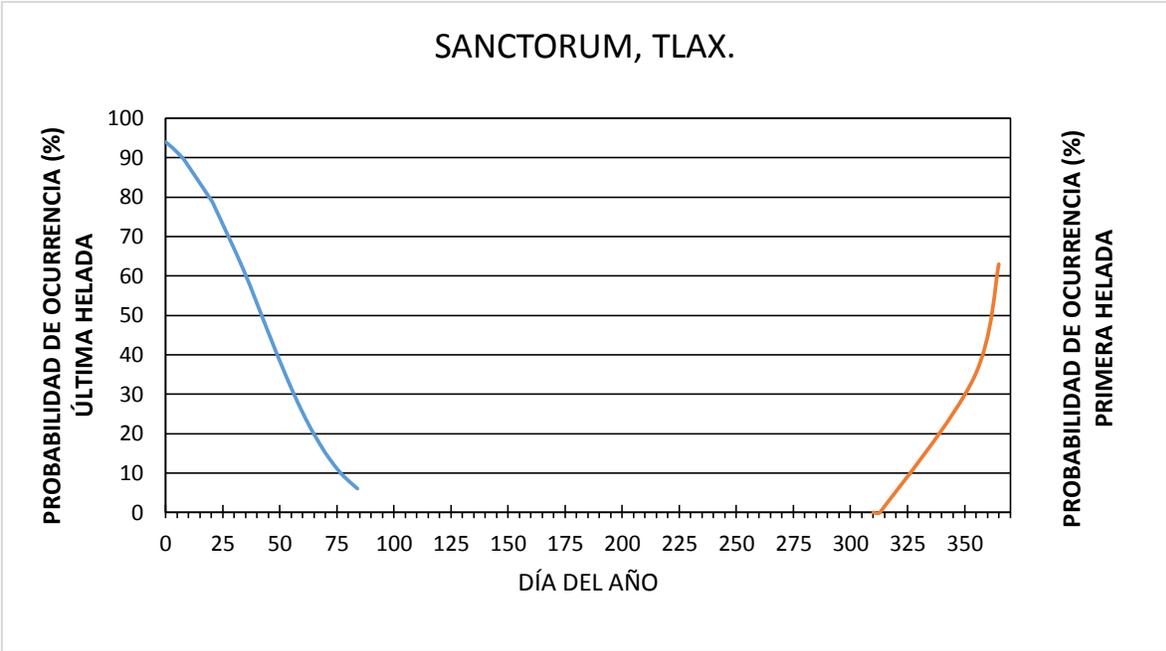
Anexo A-35. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Huamantla, Tlaxcala.



Anexo A-36. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Límites, Tlaxcala.



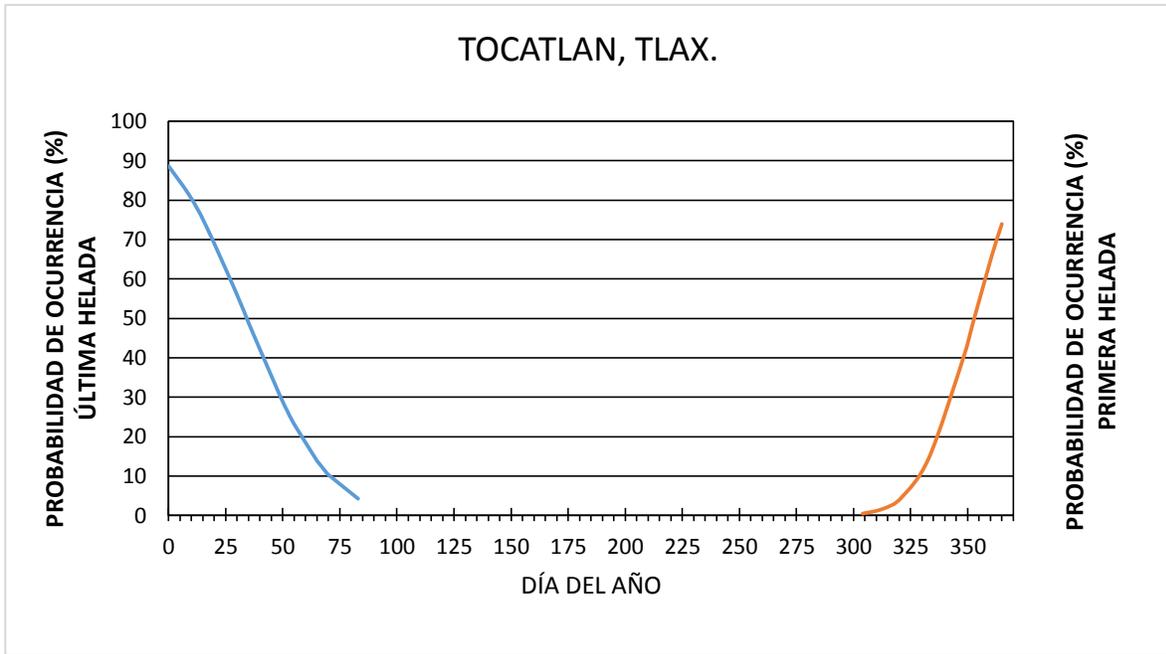
Anexo A-37. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación San Antonio Calpulalpan, Tlaxcala.



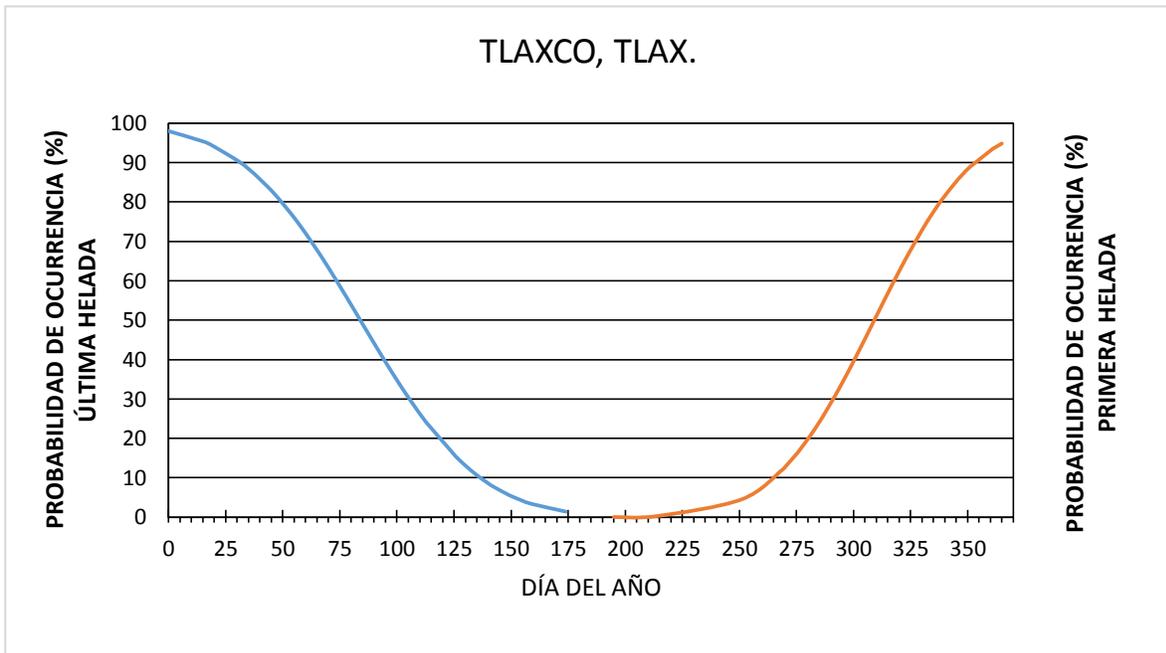
Anexo A-38. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Sanctorum, Tlaxcala.



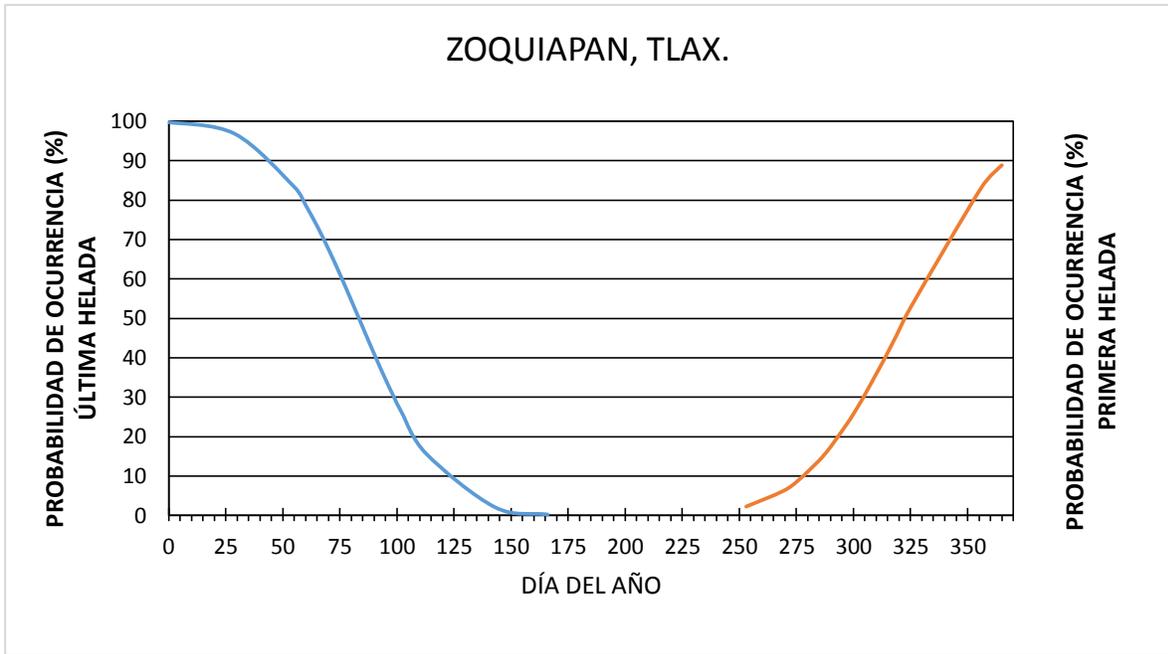
Anexo A-39. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Zitlaltepec, Tlaxcala.



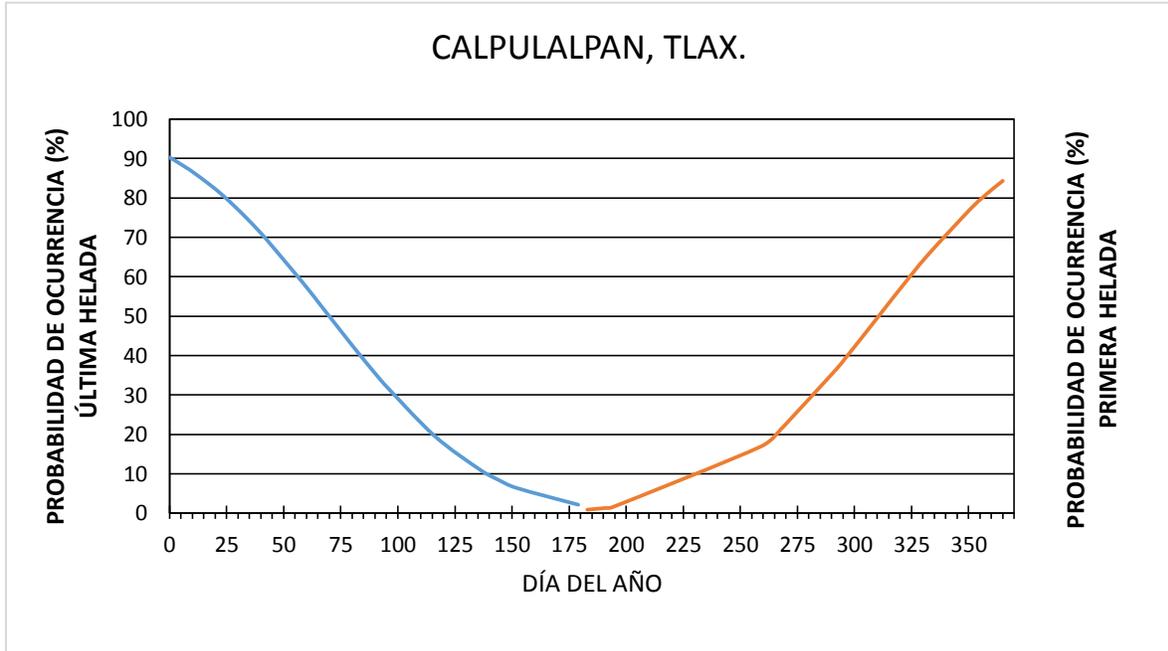
Anexo A-40. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Tocatlan, Tlaxcala.



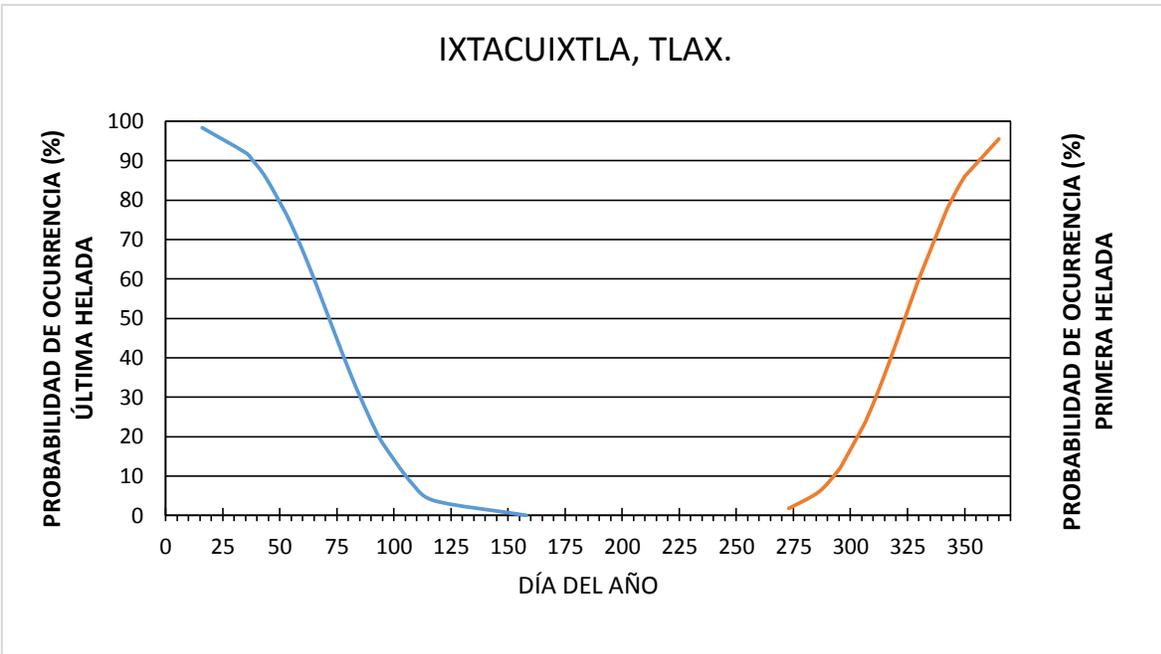
Anexo A-41. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Tlaxco, Tlaxcala.



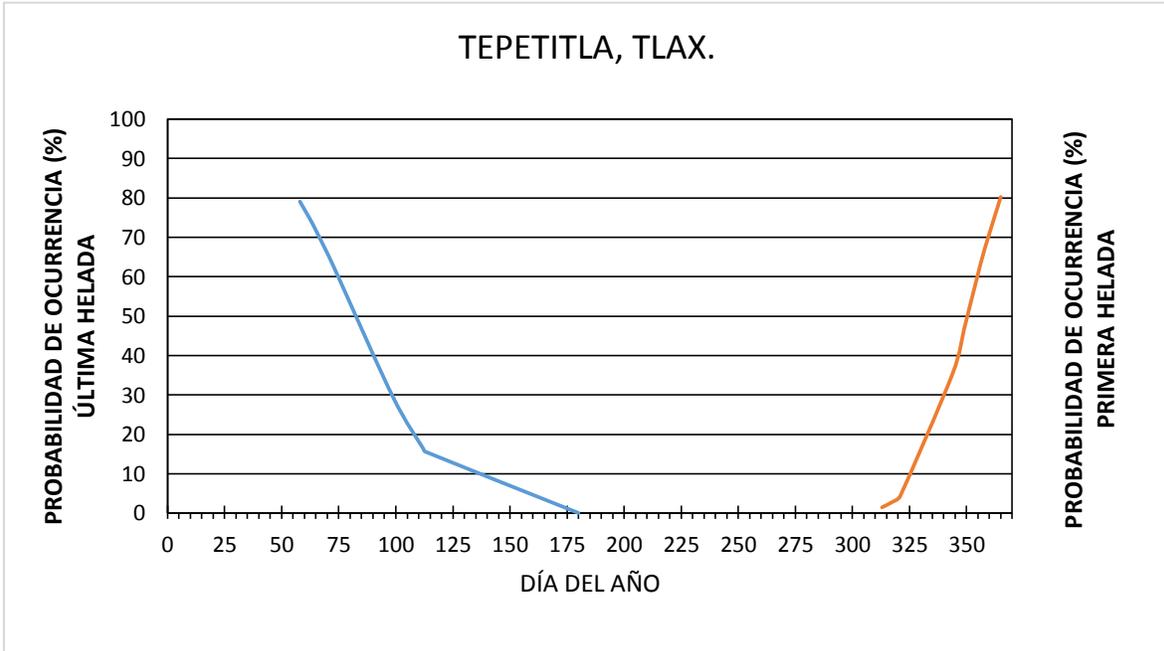
Anexo A-42. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Zoquiapan, Tlaxcala.



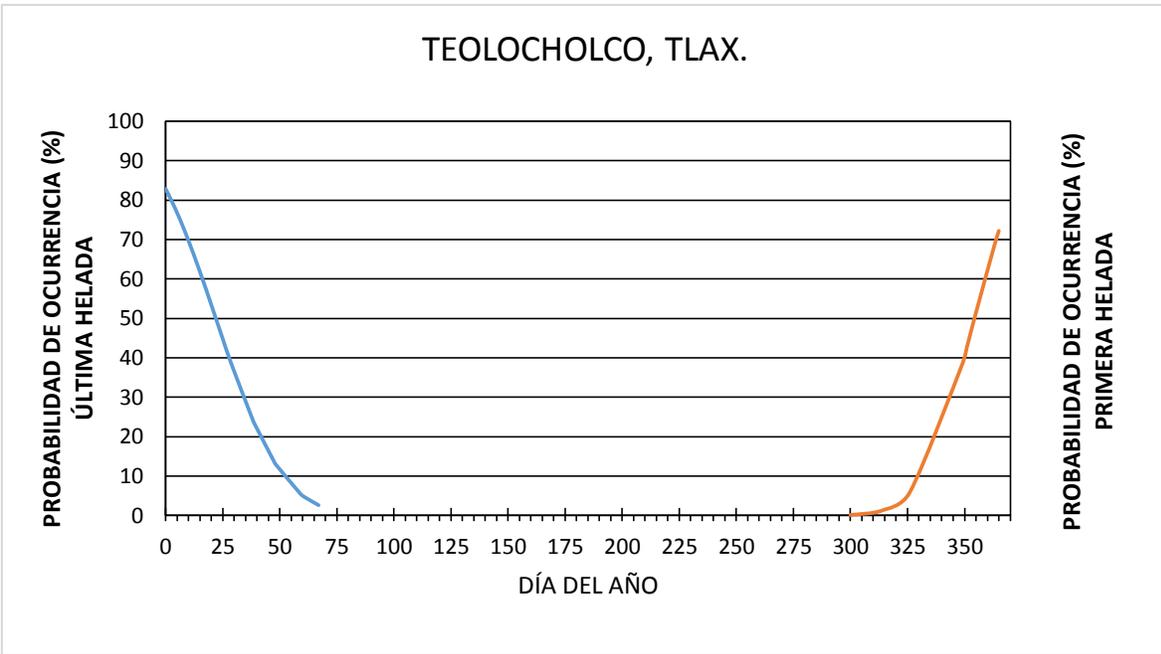
Anexo A-43. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Calpulalpan, Tlaxcala.



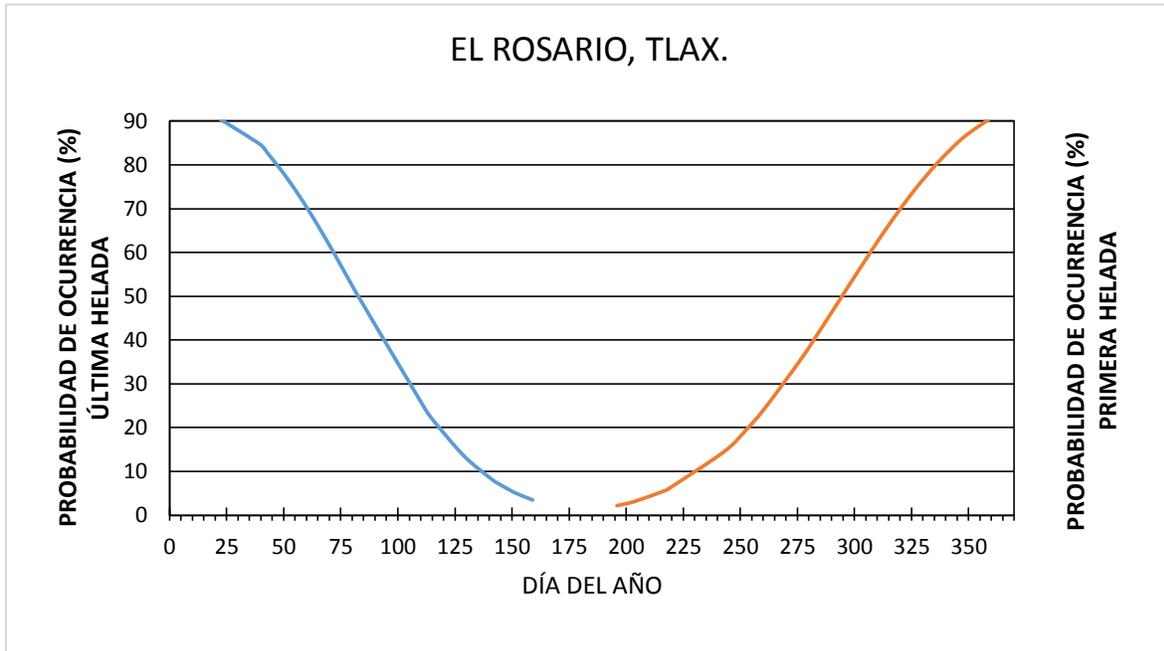
Anexo A-44. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Ixtacuixtla, Tlaxcala.



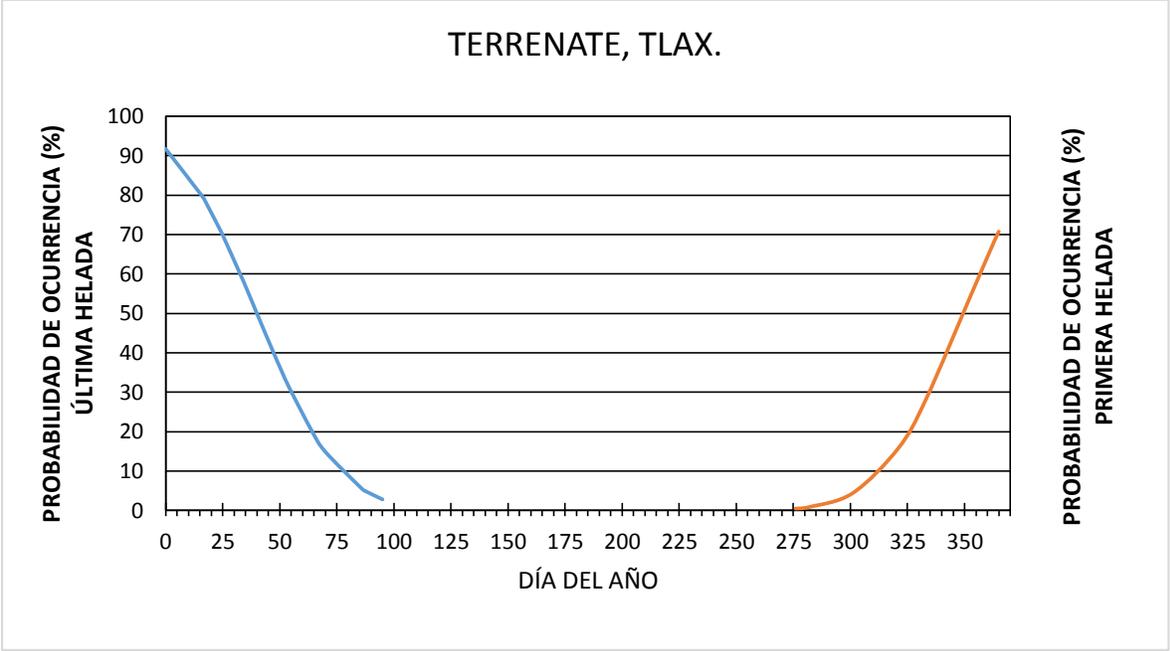
Anexo A-45. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Tepetitla, Tlaxcala.



Anexo A-46. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Teolocholco, Tlaxcala.

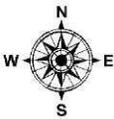
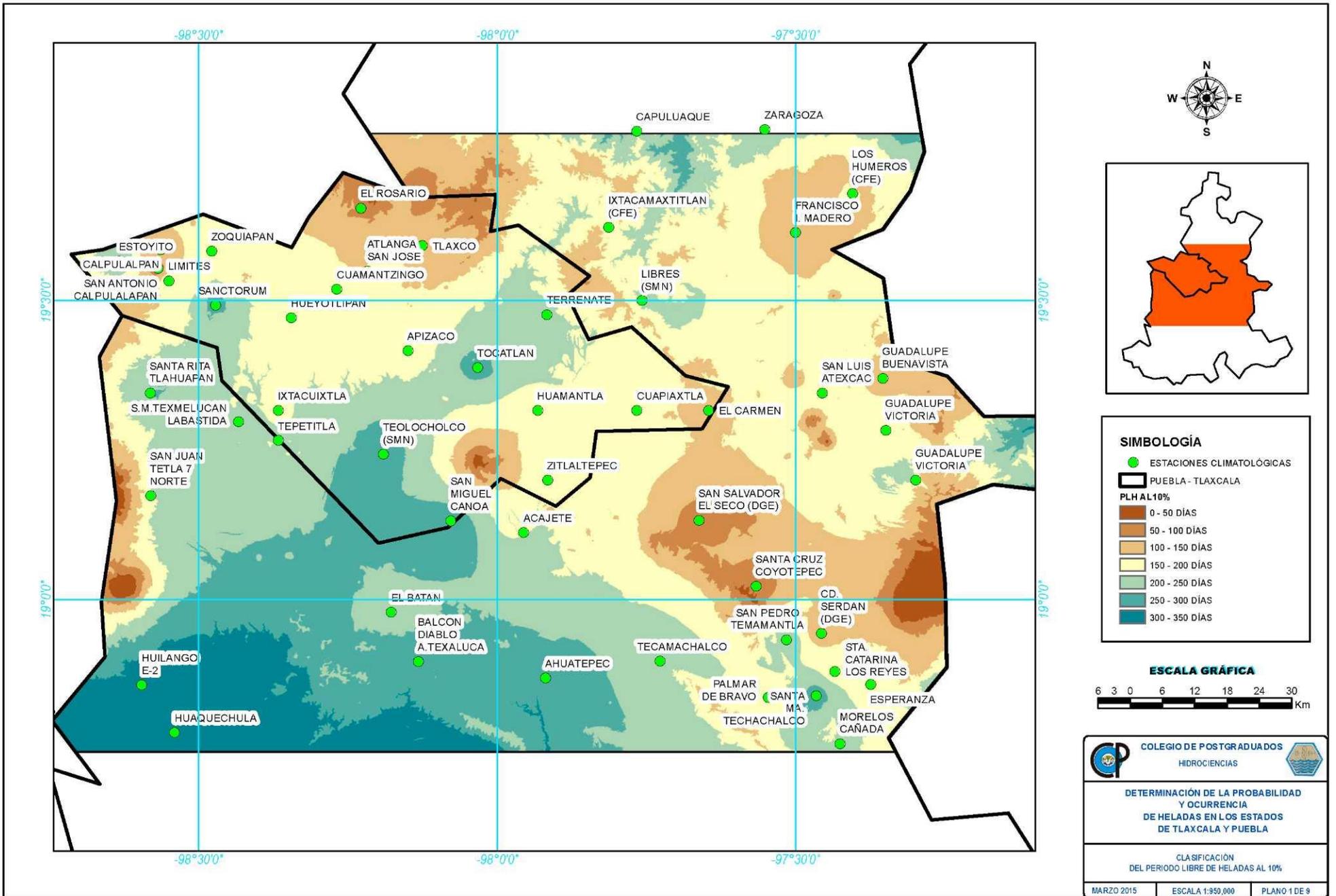


Anexo A-47. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación El Rosario, Tlaxcala.



Anexo A-48. Probabilidad de ocurrencia de la primera y última helada de la estación Terrenate, Tlaxcala.

ANEXO B: Planos de la primera, última helada y periodo libre de heladas de la zona de estudio.



SIMBOLOGÍA

- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS
- ▭ PUEBLA - TLAXCALA

PLH AL 10%

- 0 - 50 DÍAS
- 50 - 100 DÍAS
- 100 - 150 DÍAS
- 150 - 200 DÍAS
- 200 - 250 DÍAS
- 250 - 300 DÍAS
- 300 - 350 DÍAS

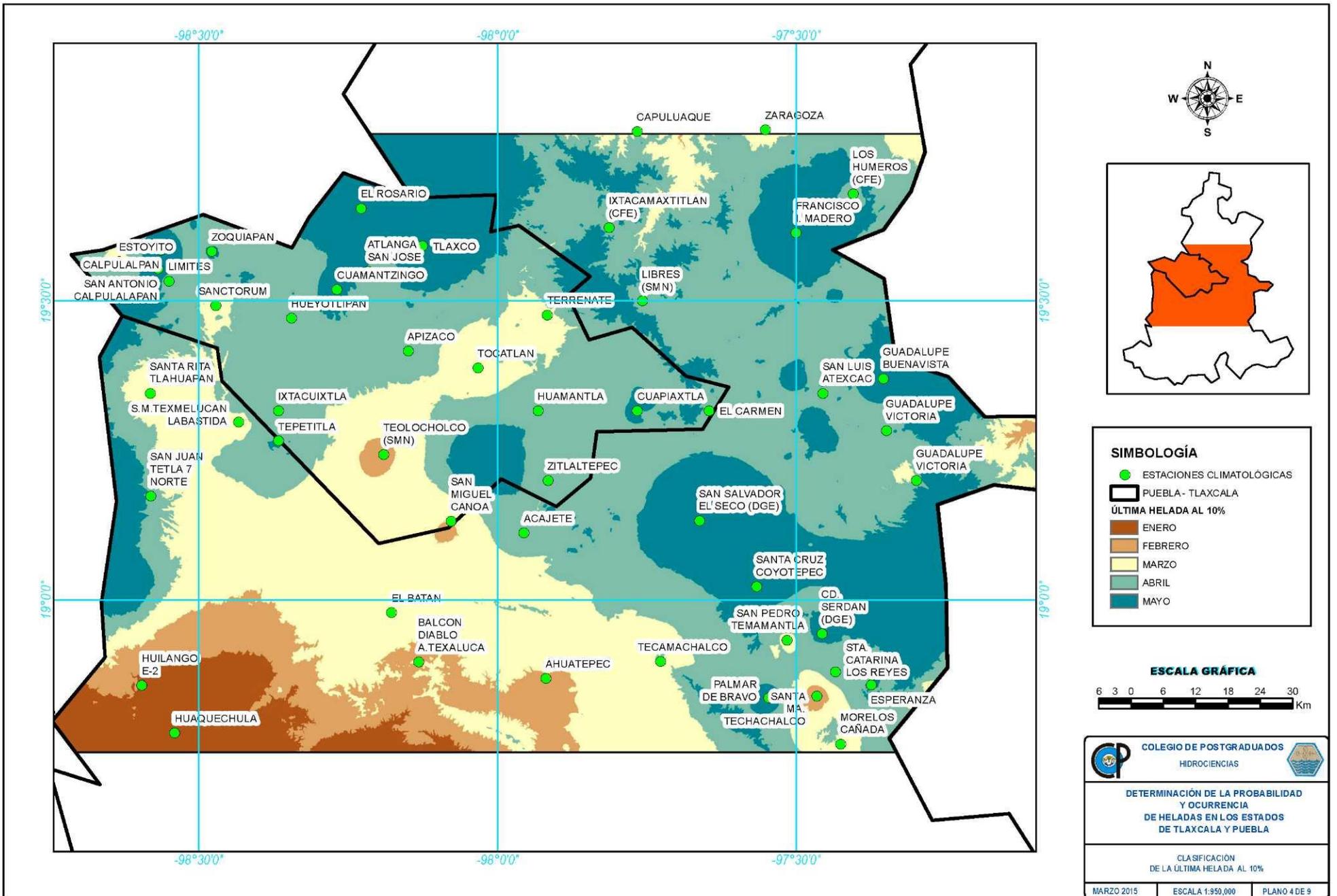


COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 HIDROCIENCIAS

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA

CLASIFICACIÓN DEL PERIODO LIBRE DE HELADAS AL 10%

MARZO 2015 ESCALA 1:950,000 PLANO 1 DE 9



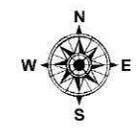
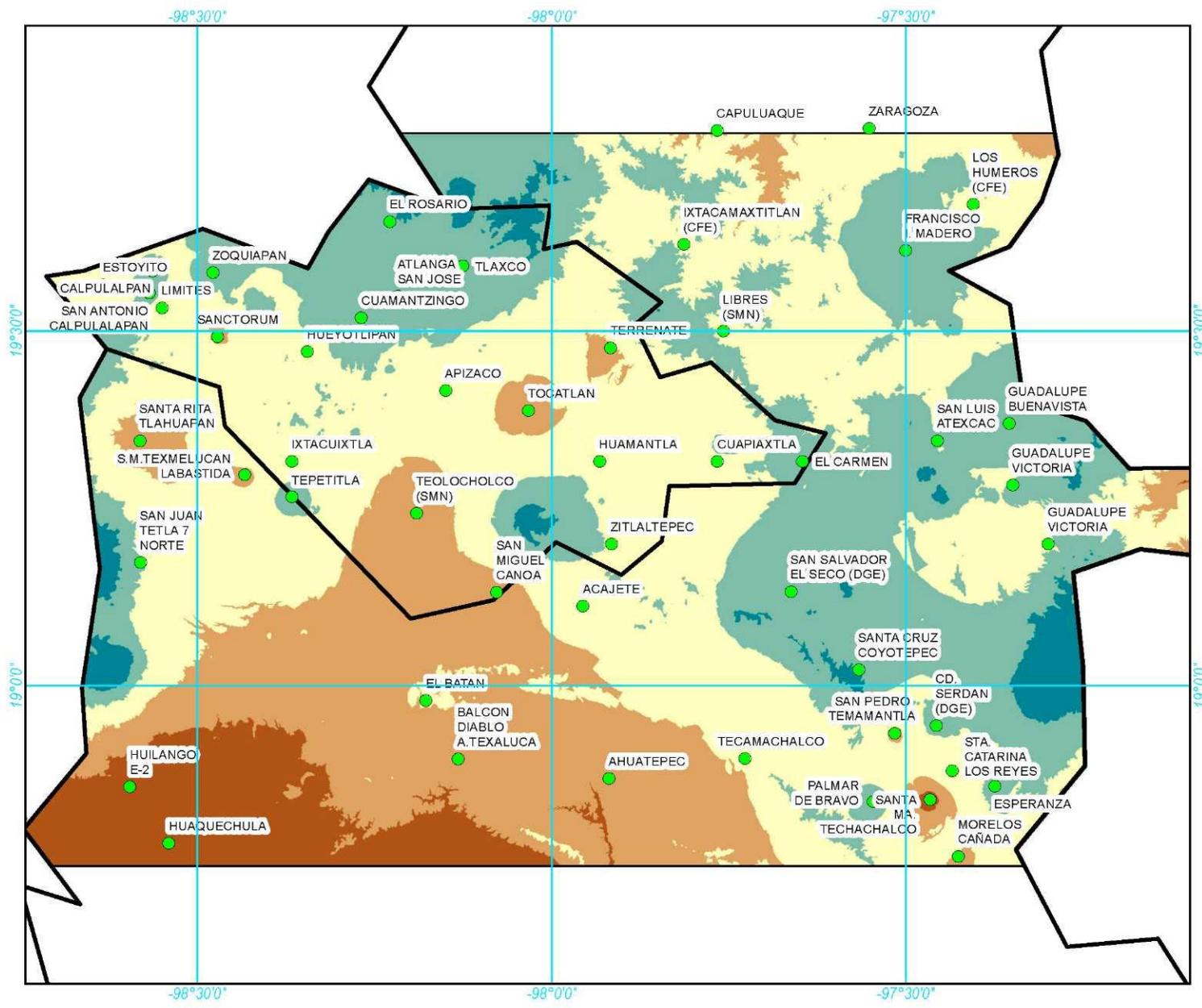
SIMBOLOGÍA

- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS
- ▭ PUEBLA- TLAXCALA
- ÚLTIMA HELADA AL 10%
- ENERO
- FEBRERO
- MARZO
- ABRIL
- MAYO



DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA

CLASIFICACIÓN DE LA ÚLTIMA HELADA AL 10%

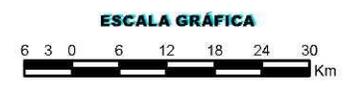


SIMBOLOGÍA

- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS
- PUEBLA - TLAXCALA

ÚLTIMA HELADA AL 30%

- ENERO
- FEBRERO
- MARZO
- ABRIL
- MAYO

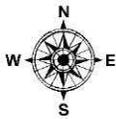
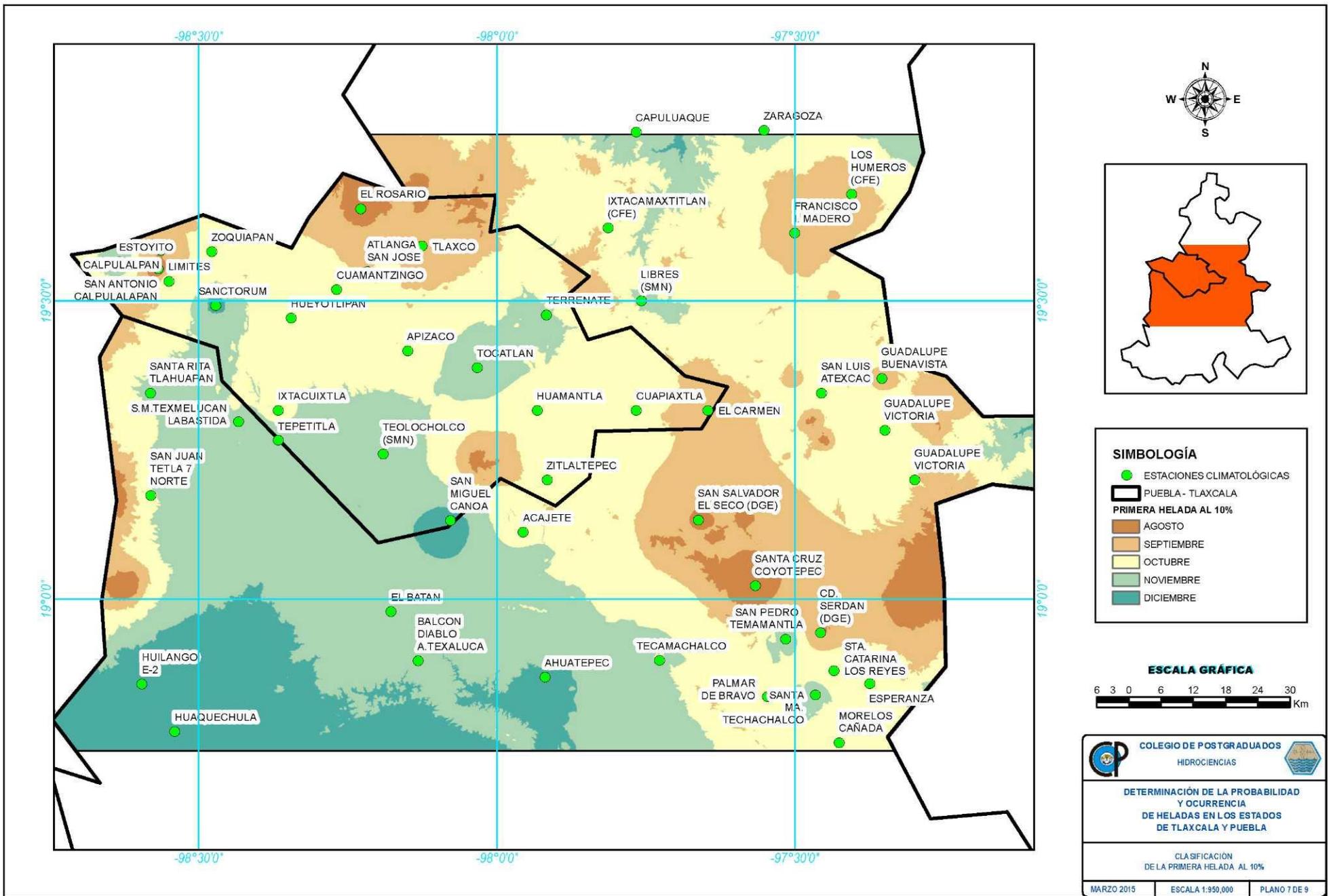


COLEGIO DE POSTGRADUADOS
HIDROCIENCIAS

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA

CLASIFICACIÓN DE LA ÚLTIMA HELADA AL 30%

MARZO 2015	ESCALA 1:950,000	PLANO 6 DE 9
------------	------------------	--------------



SIMBOLOGÍA

- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS
- ▭ PUEBLA - TLAXCALA
- PRIMERA HELADA AL 10%**
- AGOSTO
- SEPTIEMBRE
- OCTUBRE
- NOVIEMBRE
- DICIEMBRE

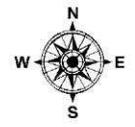
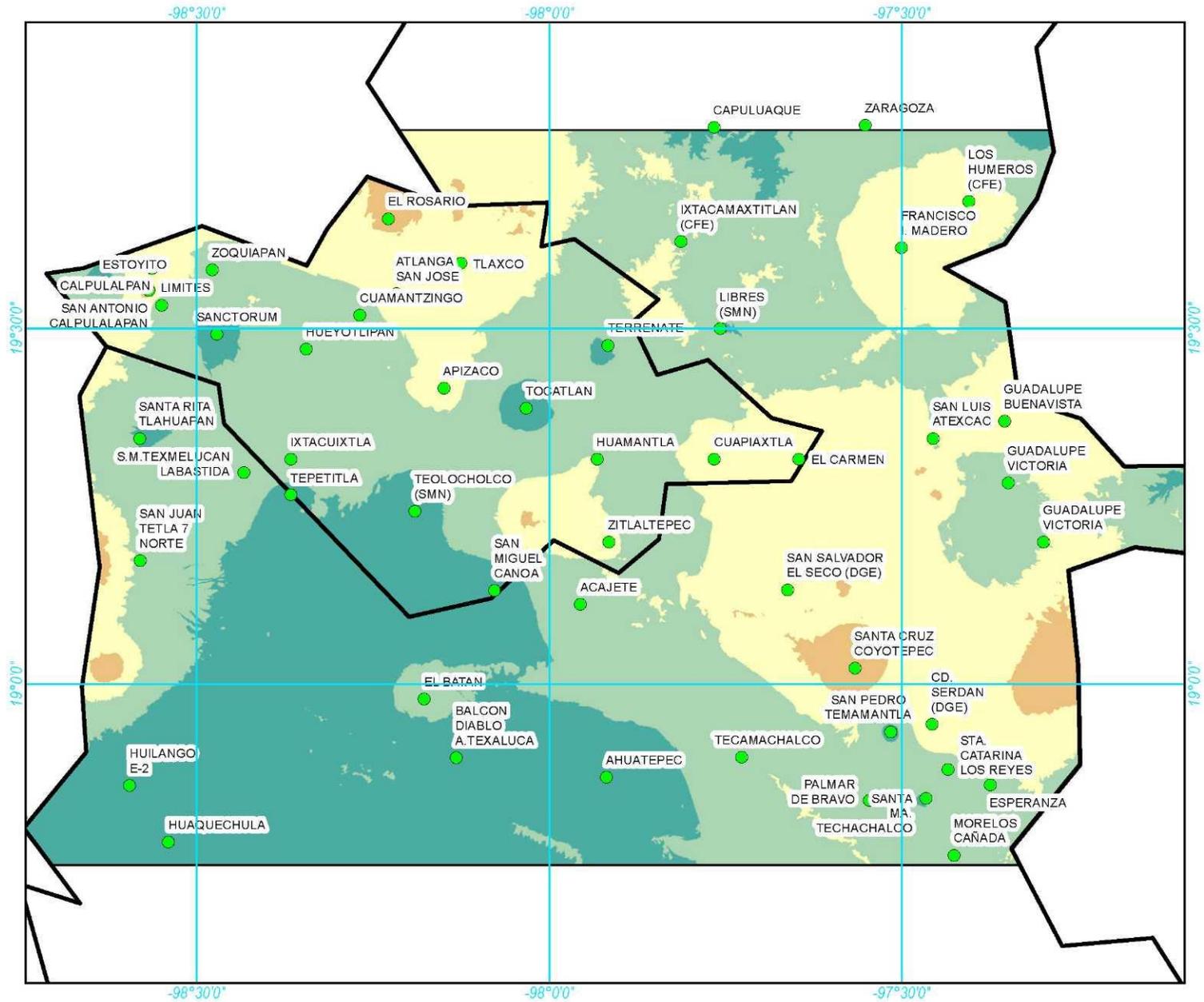


COLEGIO DE POSTGRADUADOS
HIDROCIENCIAS

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA

CLASIFICACIÓN DE LA PRIMERA HELADA AL 10%

MARZO 2015 ESCALA 1:950,000 PLANO 7 DE 9



SIMBOLOGÍA

- ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS
- PUEBLA - TLAXCALA
- PRIMERA HELADA AL 30%**
- SEPTIEMBRE
- OCTUBRE
- NOVIEMBRE
- DICIEMBRE

ESCALA GRÁFICA



<p>COLEGIO DE POSTGRADUADOS HIDROCIENCIAS</p>		
<p>DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD Y OCURRENCIA DE HELADAS EN LOS ESTADOS DE TLAXCALA Y PUEBLA</p>		
<p>CLASIFICACIÓN DE LA PRIMERA HELADA AL 30%</p>		
MARZO 2015	ESCALA 1:950,000	PLANO 9 DE 9