



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

---

---

**Determinación de la normal climática de 1987 a  
2022 de la Estación Meteorológica Almaraz**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA AGRÍCOLA**

**P R E S E N T A:**

**SAYRA BELEN ANGELES FLORES**

**Asesor: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA**

**CoAsesora: Ing. ANA KAREN GRANADOS MAYORGA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
EXAMENES PROFESIONALES de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **Tesis**

**Determinación de la normal climática de 1987 a 2022 de la Estación Meteorológica Almaraz**

Que presenta la pasante: **Sayra Belen Ángeles Flores.**  
Con número de cuenta: 417049139 para obtener el Título de: **Ingeniera Agrícola**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

**ATENTAMENTE**  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de mayo de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	M. en C. Silva Carrillo Vicente	
<b>VOCAL</b>	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Julio César Corzo Sosa	
<b>1er. SUPLENTE</b>	Dra. Gloria Herrera Vázquez	
<b>2do. SUPLENTE</b>	M. en C. Nancy Berenice Martínez Valles	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm\*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco infinitamente a mis amados padres: **Guadalupe Flores Rafael y Jaime Angeles Barreto** que, gracias a sus esfuerzos, consejos, dedicación, por siempre estar a mi lado cuando más sentía que me derrumbaba, por su gran amor. Hoy me es muy grato decírles lo hemos logrado, no me alcanzan las palabras para decírles cuanto los amo y lo agradecida que estoy.*

*A mi hermano, amigo, colega y compadre **Jaime Angeles Flores** por siempre estar apoyando cada uno de mis proyectos, por más descabellados se suenen, por todo tu amor, conocimiento y experiencias.*

*A mi **Alma Mater** por haberme permitido formarme en sus aulas, compartiendo ilusiones y anhelos, darme la oportunidad de formarme profesionalmente y como un mejor ser humano, gracias por darme el privilegio de conocer a grandes amistades de las cuales estoy muy agradecida y admiro mucho; **Lupita, Tania, Elena y Paty**.*

*A la carrera de **Ingeniería Agrícola** por mostrarme lo interesante y noble que es el campo mexicano.*

*Al **Dr. Gustavo Mercado Mancera** y a la **Ing. Ana Karen Granados Mayorga**, por compartir sus conocimientos y apoyo en todo momento para la asesoría en este trabajo, así como la confianza que tuvieron en mí de llevarlo a cabo.*

*Al **Jurado revisor**, por sus apreciables comentarios para mejorar este documento.*

*Al **Proyecto PAPIME PE208722** por el apoyo brindado para el desarrollo y culminación de este trabajo.*

## *DEDICATORIA*

*A mis padres y hermano, que son mi ejemplo de constancia y dedicación, quienes me inspiran a seguir luchando por mis sueños y me apoyan para convertirme en una mujer preparada, segura, libre y llena de amor.*

*A mis abuelitos Sra. Avelina Rafael Geronimo, Sr. Roberto Angeles Sánchez y Sra. Margarita Barreto Ortiz, porque sé que siempre confiaron en mí.*

*Para mis asesores, maestros, amigos y compañeros.*

## CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>iv</i>
RESUMEN	<i>v</i>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos particulares	2
1.2. Hipótesis	2
<b>II. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
2.1. Definición de agrometeorología, agroclimatología y normal climática	3
2.1.1. Aplicaciones de la agrometeorología y agroclimatología	6
2.2. Métodos para el cálculo de parámetros agroclimáticos	7
2.2.1. Evapotranspiración	7
2.2.2. Índices térmicos	15
2.2.2.1. Unidades calor	15
2.2.2.2. Horas frío	17
2.2.2.3. Probabilidad de ocurrencia de helada	20
2.2.3. Índices hídricos	23
2.2.3.1. Probabilidad de ocurrencia de lluvia	24
2.2.3.2. Estación de crecimiento	26
2.3. Descripción del área de estudio	29
2.3.1. Localización geográfica	29
2.3.2. Características edafoclimáticas	30
2.3.3. Localización y descripción de la Estación Meteorológica Almaraz	30
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>34</b>
3.1. Metodología	34
3.1.1. Métodos utilizados	34

	Página
3.1.2. Variables climáticas	34
3.1.3. Parámetros agroclimáticos	36
3.2. Materiales	37
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>38</b>
4.1. Variables climáticas	38
4.2. Parámetros agroclimáticos	68
4.3. Fórmula climática	83
4.4. Programa de manejo del cultivo del peral	84
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>
<b>VI. LITERATURA CITADA</b>	<b>93</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
<b>Figura 1.</b>	Componentes de la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad (FAO, 1997).	27
<b>Figura 2.</b>	Localización geográfica del Municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Gobierno del Estado de México, 2022).	29
<b>Figura 3.</b>	Parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (Google Earth, 2022).	30
<b>Figura 4.</b>	Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	31
<b>Figura 5.</b>	Estación meteorológica automática, Cuautitlán Izcalli. México.	33
<b>Figura 6.</b>	Radiación solar global ( $\text{cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	38
<b>Figura 7.</b>	Horas de insolación. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	40
<b>Figura 8.</b>	Marcha de la temperatura promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	41
<b>Figura 9.</b>	Tendencia de la temperatura promedio anual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	42
<b>Figura 10.</b>	Temperatura a la intemperie promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	44
<b>Figura 11.</b>	Oscilación térmica promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	45
<b>Figura 12.</b>	Temperatura del suelo arcilloso, promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	47
<b>Figura 13.</b>	Temperatura del suelo tepetate, promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	48
<b>Figura 14.</b>	Tendencia de la humedad ambiental promedio mensual ( $^{\circ}\text{C}$ ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	49
<b>Figura 15.</b>	Tendencia de la evaporación promedio mensual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	51
<b>Figura 16.</b>	Tendencia de la precipitación promedio mensual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	52
<b>Figura 17.</b>	Tendencia de la precipitación promedio anual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	53
<b>Figura 18.</b>	Días con precipitación promedio mensual (días). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	54



	Página
<b>Figura 19.</b> Tendencia de la presión atmosférica promedio mensual (mmHg). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México	55
<b>Figura 20.</b> Variación diaria de la presión atmosférica (mmHg) del 24 al 31 de enero de 2022. Estación Meteorológica Almaraz (2022).	56
<b>Figura 21.</b> Dirección del viento promedio mensual (grados). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	57
<b>Figura 22.</b> Velocidad del viento promedio mensual (km hr <sup>-1</sup> ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	58
<b>Figura 23.</b> Recorrido del viento promedio mensual (metros día <sup>-1</sup> ). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	59
<b>Figura 24.</b> Número promedio mensual de días cubiertos, medio cubiertos y despejados. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	60
<b>Figura 25.</b> Nubosidad promedio mensual (octas). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	61
<b>Figura 26.</b> Días con rocío promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	62
<b>Figura 27.</b> Días con niebla promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	63
<b>Figura 28.</b> Días con tormenta eléctrica promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	65
<b>Figura 29.</b> Días con granizo promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	66
<b>Figura 30.</b> Días con helada promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	67
<b>Figura 31.</b> Unidades calor acumuladas promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	69
<b>Figura 32.</b> Evapotranspiración potencial (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	70
<b>Figura 33.</b> Estación de crecimiento por disponibilidad de humedad. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	71
<b>Figura 34.</b> Estación de crecimiento por disponibilidad de temperatura. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	72
<b>Figura 35.</b> Horas frío acumuladas por el método de Da Mota y Dr. Weinberger. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	75

	Página
<b>Figura 36.</b> Probabilidad de ocurrencia de lluvia por el método de distribución acumulada. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	76
<b>Figura 37.</b> Probabilidad de ocurrencia de lluvia por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	77
<b>Figura 38.</b> Ocurrencia de lluvia mensual al 70% de probabilidad por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	78
<b>Figura 39.</b> Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Da Mota. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	79
<b>Figura 40.</b> Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	80
<b>Figura 41.</b> Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Pájaro y Ortiz. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	81
<b>Figura 42.</b> Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Arteaga. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	82
<b>Figura 43.</b> Fases fenológicas del árbol de peral (Fleckinger, 1965 citado por De Paz, 2020).	84

## ÍNDICE DE TABLAS

		Página
<b>Tabla 1.</b>	Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia, Ahmad <i>et al.</i> (2017).	10
<b>Tabla 2.</b>	Coefficiente de ajuste “C” para estimar la evapotranspiración potencial en función de la evaporación medida del tanque tipo A (Cisneros, 2003).	14
<b>Tabla 3.</b>	Unidades calor acumuladas por mes, en función de tres valores de temperatura base. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	68
<b>Tabla 4.</b>	Horas frío acumuladas por periodo invernal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México	74
<b>Tabla 5.</b>	Ocurrencia de lluvia mensual al 70% de probabilidad por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.	77
<b>Tabla 6.</b>	Duración del periodo de bajo riesgo de helada, de acuerdo con el método y porcentaje de probabilidad. Estación meteorológica Almaraz Cuautitlán Izcalli, México.	82
<b>Tabla 7.</b>	Estados fenológicos del peral y fechas (día juliano) de aparición de acuerdo con el año evaluado. Cuautitlán Izcalli, México.	85
<b>Tabla 8.</b>	Programa de gestión en campo para el cultivo del peral (Elaboración propia).	86

## RESUMEN

Los valores promedio de las variables climáticas permiten planear y realizar acciones en relación con la agricultura, ya que tienen una mayor influencia sobre el desarrollo de las plantas y los procesos de producción. El objetivo del presente trabajo fue determinar la tendencia normal de los elementos del clima y de los parámetros climáticos registrados de julio de 1987 a febrero de 2022, en la estación meteorológica Almaraz, en la FES Cuautitlán, en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Se analizó la tendencia de los elementos del clima durante este periodo a través de diversos métodos, asimismo, se obtuvieron los valores de algunos parámetros agroclimáticos. Los resultados mostraron que el clima de la zona es templado subhúmedo con lluvias de verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco largo, sin sequía intraestival, el mes más caliente es junio, con poca oscilación térmica. La presión atmosférica media promedio anual es de 583.4 mmHg; con una temperatura media anual de 15.4 °C; una precipitación promedio anual de 652.1 mm; el periodo de bajo riesgo de heladas es de 213 días; se acumula un promedio de 555 horas frío; con una temperatura base de 8 °C se acumulan 2,707.7 unidades térmicas; y una estación de crecimiento por disponibilidad de humedad que inicia en el mes de mayo y finaliza en octubre. Los resultados de este estudio permiten implementar el entendimiento del clima y sus tendencias, como herramienta para visualizar programas agrícolas, analizando los posibles escenarios que afecten o favorezcan el desarrollo de los cultivos. Se concluye que este análisis muestra la variabilidad climática durante los 34 años de trabajo de la estación meteorológica Almaraz. Se sugiere continuar con el trabajo que se desarrolla en ella, para incrementar el banco de datos, además realizar más estudios que ayuden a comprender los cambios que sufre el tiempo atmosférico y su relación con las actividades agrícolas en su más amplia expresión.

## I. INTRODUCCIÓN

En la agricultura, uno de los factores indispensables a considerar es el clima, ya que el éxito o fracaso de los cultivos está íntimamente relacionado con las condiciones ambientales predominantes de una determinada región, de manera que la dependencia directa a causa de las condiciones ambientales determina, en gran medida, la viabilidad y el desarrollo de las producciones agrícolas. El monitoreo de las condiciones climáticas puede ser empleado por los productores para una planificación satisfactoria y en consecuencia tomar acciones preventivas que minimicen el daño en la producción. Al meteorólogo le permite realizar el pronóstico de la presencia de lluvias, granizo, heladas, inundaciones, periodos de sequía, entre otros, fenómenos que tienen efectos adversos en las etapas de desarrollo de los cultivos.

La disponibilidad de una base de datos climatológicos implica una recopilación de datos históricos, mediante una red de observaciones, con la ayuda de procedimientos precisos y normalizados, que, a su vez, responden interrogantes a problemas relacionados a la investigación, en el manejo y planes de acción para el mejoramiento de los cultivos (SensorGo, 2020).

Algunas de las intervenciones agrícolas, servicios y estudios de investigación requieren información sobre el clima de manera diaria, semanal o con una base de diez días. Esta información es generada a través de una estación meteorológica, la cual está conformada por instrumentos y personal capacitado, tanto para la instalación de diferentes sensores y medidores, los cuales están ubicados en sitios estratégicos para la región geográfica donde requiere hacer las mediciones y monitoreo (Ferrerías, 2002).

La estación meteorológica Almaraz de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la UNAM, ha generado un registro de datos durante sus 34 años de existencia, permitiendo elaborar predicciones a partir de los modelos numéricos que acercan a la tendencia normal del clima del área referente de la misma estación. A través de estos años, Flores (1998) realizó un análisis que comprendió el primer periodo de 10 años (1987-1997); un segundo trabajo por espacio de 5 años adicionales (1998-2002) fue reportado por Trejo (2004); un tercer trabajo reportado por Rodríguez (2014), que incluyó una serie de datos desde el comienzo de la estación hasta diciembre de 2013, con un periodo de 26 años (1987-2013). Por consiguiente, el presente trabajo actualiza e integra los datos generados, durante el periodo de julio de 1987 a febrero de 2022.

La información obtenida de la estación meteorológica Almaraz ha permitido la planeación de actividades agropecuarias con fines de investigación en la Facultad, asimismo, la programación agrícola y prácticas que complementan principalmente a las asignaturas de la Carrera de Ingeniería Agrícola, al igual que el resto de la comunidad estudiantil y docentes, o aquellos que se puedan beneficiar de la información obtenida de la estación meteorológica, con el objetivo de impulsar la investigación.

Para llevar a cabo el presente estudio, fue necesario tomar en cuenta los datos generados diariamente durante el periodo de trabajo de 1987 a 2022 en la estación meteorológica, lo que permitió calcular la tendencia del comportamiento de los parámetros agroclimáticos y la presencia de algunos fenómenos meteorológicos; por lo cual, se plantearon los siguientes objetivos.

### 1.1. Objetivo general

- Estimar la tendencia normal de los elementos climáticos registrados de julio de 1987 a febrero del 2022, en la estación meteorológica Almaraz, en Cuautitlán Izcalli, México.

#### 1.1.2. Objetivos particulares.

- Analizar la tendencia de los elementos del clima registrados de 1987 a 2022, en la estación meteorológica Almaraz, en Cuautitlán Izcalli, México.
- Determinar los valores de los parámetros agroclimáticos del período de estudio, con base en los valores promedio de los elementos del clima registrados en la estación.
- Establecer un plan de manejo para el cultivo del peral con base en las condiciones agroclimáticas del área de estudio.

### 1.2. Hipótesis

- El desarrollo fenológico está determinado por la variación de los elementos climáticos, lo que a su vez influye en el rendimiento de los cultivos agrícolas.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Definición de agrometeorología, agroclimatología y normal climática

La agricultura es una de las actividades económicas más propensas a los riesgos climáticos debido a las características propias del sistema productivo, al estar constituido por sistemas biológicos complejos con tendencia a obtener mejores rendimientos; basado en la interacción del genotipo, ambiente y manejo agronómico (INTA, 2017).

Para determinar la viabilidad de un sistema de producción, en la obtención de altos y mejores rendimientos, se requiere describir el papel que juega el medio ambiente y en particular la atmósfera. Conceptualizar el tiempo y el clima, es primordial para establecer los antecedentes; el tiempo atmosférico es el estado de condiciones meteorológicas en un momento dado, el cual puede durar horas, días e inclusive semanas (Maderey, 1979).

Alejandro Von Humboldt, considerado padre de la climatología, definió el clima como, *“el conjunto de variaciones atmosféricas que afectan los órganos de manera sensible: la temperatura, la humedad, los cambios de la presión barométrica, la calma de la atmósfera, los vientos, la tensión más o menos fuerte de la electricidad atmosférica, la pureza del aire y el grado ordinario de transparencia o de serenidad del cielo”* (Klein y Sanson, 1928 citado por Gómez, 2017).

A partir del estudio de los meteoros surge la meteorología y climatología; la meteorología, es la ciencia que tiene por objeto de estudio la atmósfera, cuyo comportamiento presenta variaciones ligeras o bruscas de un día a otro, así se observan como cambian constantemente la temperatura, humedad, vientos, entre otros fenómenos (Rodríguez *et al.*, 2004). Estos fenómenos atmosféricos o meteoros son de distinto origen: los vientos son considerados como meteoros aéreos; la lluvia, nieve y granizo, meteoros acuosos; el arcoíris y las auroras, meteoros luminosos. Cada uno de ellos responde a condiciones específicas de la atmósfera y geografía de esta (Ovejero, 1999).

La climatología estudia el tiempo atmosférico, conformado por varios años de metódicas observaciones, caracterizando el clima de un lugar, que se puede definir como el estado medio de la atmósfera (Rodríguez *et al.*, 2004), al igual que los elementos que los conforman, como son: la temperatura, precipitación, viento, humedad, presión atmosférica y nubosidad, la relación entre sí mismos, su distribución geográfica y su influencia en los seres vivos (Ovejero, 1999).

Es indudable que la climatología y meteorología se encuentran íntimamente relacionadas, pues su objeto de estudio es el mismo, aunque desde diferentes puntos de vista. La diferencia de estas ciencias se apoya en que la meteorología estudia el comportamiento físico de la atmósfera y sus leyes, y analiza el comportamiento de ésta ante un fenómeno específico, como por ejemplo un huracán (Rodríguez *et al.*, 2004), los datos aportados por la meteorología se mantienen durante un periodo corto (de minutos, días o meses) (Rodríguez y Ramos 2017), lo que permite concretar el tiempo atmosférico existente en una zona (Albareda *et al.*, 1998). La climatología, por lo contrario, no se dedica a efectuar pronósticos del tiempo, o por lo menos no a nivel diario, la acumulación de estos datos es por periodos más largos, aproximadamente 30 años (Rodríguez y Ramos, 2017).

Diferentes reportes anuales hacen mención sobre las consecuencias de eventos climáticos asociados a una mayor variabilidad climática, afectando a gran escala a la agricultura y la ganadería, de manera que la caracterización agrometeorológica se convierte en una herramienta para la evaluación de los riesgos climáticos y realizar pronosticaciones para una mejor producción. La agrometeorología es la ciencia que estudia las condiciones meteorológicas, climáticas e hidrológicas, y su interrelación en los procesos de la producción agrícola es significativa (Soler, 2015; INTA, 2017), debido a la identificación oportuna de la asociación “insumos para la producción-oportunidad en la aplicación”, por lo que, las prácticas agrícolas se convierten en una agricultura climáticamente inteligente (Gómez, 2017).

Torres Ruiz (1995) señaló que la agrometeorología estudia la relación del tiempo con la producción de los cultivos agrícolas, incluyendo las enfermedades y plagas que afectan a las plantas, por lo que, es conveniente tomar decisiones al incorporar el Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIPE), mediante una base de datos meteorológicos. Además, la influencia de los factores y elementos del clima sobre la fenología de los cultivos.

En otras palabras, se puede señalar que la agrometeorología estudia las relaciones del tiempo con respecto a las actividades agrícolas, así como, la relación de la planta con sus enfermedades o plagas, al igual que el pronóstico de adversidades meteorológicas, como granizo, heladas o sequías (Gómez, 2017).



Mientras que la agroclimatología examina la adaptación de los cultivos agrícolas a los climas y la influencia de los factores climáticos con respecto a la fenología de los cultivos y plagas agrícolas, además de concentrarse en su aplicación en la planificación de las actividades (Gómez, 2017).

Los valores estadísticos que se obtienen en los registros diarios de los elementos del clima reciben el nombre de normal climática (Rodríguez, 2014), los cuales tienen dos fines principales. El primero establece una referencia para evaluar las condiciones actuales o recientes y en segundo lugar se utilizan para fines de predicción, de las condiciones que experimenten un determinado lugar (OMM, 2007).

De acuerdo con el reglamento técnico de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2007) se define:

- Normales: medias calculadas tomando un periodo uniforme y relativamente largo que comprende por lo menos tres periodos consecutivos de 10 años.
- Normales climatológicas estándares: medias de datos climatológicos calculadas para periodos consecutivos de 30 años; estos reportes salen cada 10 años, por ejemplo, desde el 1 de enero de 1901 hasta el 31 de diciembre de 1930, desde el 1 de enero de 1911 hasta el 31 de diciembre de 1940, desde el 1 de enero de 1921 hasta el 31 de diciembre de 1950 y así sucesivamente.

Guttman (1989) describió el término de “normal” que surgió por primera vez en la literatura meteorológica en 1840, tiempo después se utilizó por primera vez en 1872, cuando el Comité Meteorológico Internacional decidió recopilar los valores medios en el transcurso de un periodo uniforme con el fin de garantizar la compatibilidad entre los datos recogidos en diversas estaciones. En la conferencia de Varsovia el Comité Meteorológico Internacional de 1935, recomendó utilizar el concepto de normal climatológica estándar de 30 años, como periodo estándar mundial para cálculos de normales (OMM, 2007).

En el presente trabajo se utilizó un periodo de 34 años para el cálculo de la normal climática en la zona de estudio, se actualiza la base de referencia hasta el periodo actual, lo que dispone de un contexto más reciente que permite comprender los fenómenos meteorológicos, climáticos extremos

y las predicciones, así como, identificar la evolución de las variaciones climáticas y comparar las condiciones registradas en el pasado.

### 2.1.1. Aplicaciones de la agrometeorología y agroclimatología

La estación meteorológica es una herramienta, que proporciona información para definir la zonificación del establecimiento de los cultivos, y cumplir con las necesidades que demanden cada uno de ellos como; horas luz, precipitación, humedad, radiación, entre otras, lo que permite ser más productivos y amigables con el medio ambiente (Radio UdeC, 2021).

Las principales aplicaciones que permite realizar la agrometeorología son:

- Categorización del clima.
- Determinar variables climáticas como temperatura del aire, precipitación, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa.
- Programación de las prácticas del manejo del cultivo, principalmente; aplicaciones de fertilizantes, manejo integrado de plagas y enfermedades, riego, cosechas.
- Investigación para comprender los procesos de las plantas en relación con su microclima.
- Planificación de patrones o sistemas de cultivos.
- Determinación de fechas del establecimiento y manejo del cultivo.
- Utilización de maquinaria agrícola en momentos oportunos.
- Medidas de prevención y mitigación como barreras de protección, contra la presencia de heladas, lluvias excesivas, granizo, sequías y demás.
- Hacer uso de los índices históricos de las variables del clima, para un nuevo establecimiento agrícola (Rodríguez *et al.*, 2004; Cardoso, 2011; Ahmad *et al.*, 2017).

Las principales aplicaciones que permite realizar la agroclimatología son:

- Zonificación de nuevas áreas agrícolas.
- Introducción de nuevo materiales cultivables.
- Definir las incertidumbres climáticas con respecto al ambiente de cada cultivo, con el objeto de eliminarlas o amortiguarlas.
- Planeación de las fechas de siembra y cosecha.
- Planeación y ejecución de sistemas de riego.

- Predicción de rendimientos.
  - Transporte y almacenamiento de productos agrícolas.
  - Manejo eficiente de los suelos.
  - Identificación de las necesidades y características bioclimáticas y ecofisiológicas de los cultivos.
  - Pronóstico de la ocurrencia de heladas y periodos libres de heladas.
  - Pronóstico de incendios forestales.
  - Introducción de razas ganaderas. Utilización de pastos forrajeros.
- (FECYT, 2004; Rodríguez, 2014).

## 2.2. Cálculo de variables agroclimáticas

Para determinar los valores y tendencias agroclimáticas, se pormenorizan los métodos utilizados en el presente trabajo.

### 2.2.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) de acuerdo con Van Bavel (1961) se define como el proceso mediante el cual, el agua se mueve desde la superficie terrestre hacia la atmósfera en forma de vapor. Compuesta por dos procesos que incluye la evaporación de la superficie del suelo y las plantas, así como la transpiración de agua, que se encuentra en los tejidos vegetales, a través de sus estomas (FAO, 2006). La evaporación y transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre dos procesos (Barrios, 2017).

La evaporación es un proceso en donde el estado líquido del agua se convierte en gaseoso o vaporización en una superficie libre por debajo de su punto de ebullición. Por lo que, juega un papel importante en el ciclo hidrológico, determinando las necesidades de agua de riego de los cultivos (Ahmad *et al.*, 2017).

Para este proceso las moléculas de agua requieren energía de la radiación directa y en menor proporción de la temperatura del aire. La fuerza que impulsa este cambio se obtiene de la diferencia entre la presión de la evaporación de una superficie y la presión de la humedad atmosférica. Otros parámetros que considerar son la temperatura del aire y la velocidad del viento. En una superficie

cultivada se determina la evaporación a través por la cantidad de sombra que genera el dosel del cultivo, ya que esta puede incrementar de acuerdo con la etapa fenológica (FAO, 2006).

La transpiración consiste en la vaporización del agua predominante en tejidos vegetales y su posterior remoción hacia la atmósfera. Esto ocurre, con la incorporación del agua, junto con algunos nutrimentos, absorbidos a través de los pelos radicales que permiten la absorción y el ascenso del agua, mediante hidroporinas, proteínas membranales responsables del transporte y regulan la entrada o salida del agua en las células a través del xilema (Grajales, 2004). La mayor parte de agua absorbida del suelo se pierde por transpiración estomática y solo un pequeño porcentaje forma parte de los tejidos vegetales (FAO, 2006). La tasa de transpiración también es afectada por las características del cultivo, el medio donde se produce y su manejo.

En las primeras etapas del cultivo, en el momento de la siembra, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, finalmente con el desarrollo del cultivo la cobertura vegetal abarca la mayor parte de este y más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Allen *et al.*, 1991 citado por FAO, 2006).

Una manera de reducir sustancialmente la evaporación del suelo es mediante el uso de coberturas que favorecen el reflejo del suelo, reducen pérdidas de agua del cultivo, al igual que la tasa de transpiración, especialmente cuando el cultivo es pequeño (FAO, 2006).

De acuerdo con el Glosario Internacional de Hidrología y el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM/UNESCO, 1992), definen la evapotranspiración potencial, como la cantidad máxima de agua que se puede evaporar en un clima dado, de una extensión continua de vegetación que cubre todo el terreno y bien abastecido de agua. Incluye evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación de una región específica en un tiempo determinado, expresado como profundidad de agua (Torres, 1995; Ahmad *et al.*, 2017).

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración de una superficie de referencia hipotética, que se asemeja mucho a una superficie de vegetación verde, humedad uniforme, de altura que sombrea completamente el terreno (Ahmad *et al.*, 2017)

La unidad de medida de la evapotranspiración son milímetros (mm) por unidad de tiempo. La unidad de tiempo puede ser una hora, un día, diez días, un mes o incluso un periodo completo de cultivo o un año, con respecto a una superficie cultivada (Rodríguez, 2014).

La estimación de la ET se obtiene por medio de dos métodos, directos o indirectos. Los directos proveen de primera mano el consumo total del agua requerida, por lo tanto, se requiere uso de instrumentos adecuados para su valoración.

Entre los métodos directos se tienen:

- El método Lisimétrico.
- El método Gravimétrico en parcelas experimentales.
- El método de entradas y consumo de agua.

Los métodos indirectos estiman el consumo del agua a través de todo el ciclo vegetativo. Para ello, se complementa con una base de datos meteorológicos (Ponce, 1989 citado por Rodríguez, 2014).

Entre los principales métodos se tienen:

- El método de Blaney y Criddle (1950).
- El método del Tanque de Evaporación Tipo A (1968).
- El método de Penman Monteith (1948).
- El método de Thornthwaite (1948).

Así mismo, de acuerdo con Ahmad *et al.*, (2017) mencionan algunos métodos comunes (Tabla 1) para estimar la ET de referencia.

**Tabla 1. Métodos para estimar la evapotranspiración de referencia, Ahmad *et al.*, (2017).**

No.	Método de estimación de $ET_0$	Ecuaciones	Datos meteorológicos requeridos
1	FAO-24 Corregido de Penman	$ET_0 = c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2.7W_f(e_s - e_a) \right]$	Radiación neta, déficit de presión de vapor y velocidad del viento.
2	Priestley-Taylor (P-T)	$ET_0 = \infty \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \right]$	Radiación neta, déficit de presión de vapor y velocidad del viento.
3	FAO-24 Blaney-Criddle (F B-C)	$ET_0 = a + b[p * 0.46\bar{T} + 8.13]$	Horas anuales del día, temperatura y velocidad del viento.
4	FAO - Evaporación del tanque	$ET_0 = K_{tanque} * ET_{tanque}$	Evaporación del tanque
5	Penman Monteith	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{significativa} + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	Déficit de presión de vapor, flujo de radiación, velocidad del viento, temperatura y flujo de calor del suelo.

Donde:

$ET_0$ = evapotranspiración ( $mm \text{ dia}^{-1}$ )

$R_n$ = radiación neta en la superficie del cultivo ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

$G$ = densidad de flujo de calor del suelo ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )

$T_{significativa}$ = temperatura media diaria del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}C$ )

$U_2$ = velocidad del viento a 2 m de altura ( $m \text{ s}^{-1}$ )

$e_s$ = presión de vapor de saturación (kpa)

$e_a$ = presión de vapor real (kpa)

$e_s - e_a$  = déficit de presión de vapor de saturación (kpa)

$c$  = factor de ajuste para compensar el efecto de las condiciones climáticas diurnas y nocturnas

$W$ = factor de ponderación relacionado con la temperatura

$f$ = función relacionada con el viento

$T$ = temperatura media diaria, durante el mes considerado ( $^{\circ}C$ )

$a$ = albedo o coeficiente de reflectividad

$p$ = porcentaje medio diario del total de horas diurnas anuales, para un mes y latitud determinados

$\Delta$  = curva de presión de vapor de decantación ( $kpa \text{ } ^{\circ}C^{-1}$ )

$\gamma$  = constante psicrométrica ( $kpa \text{ } ^{\circ}C^{-1}$ )

$E_{tanque}$ = evaporación del tanque ( $mm \text{ dia}^{-1}$ )

$K_p$ = coeficiente del tanque (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Para la estimación de cualquier cultivo bajo condiciones no estándares se calcula multiplicando la evapotranspiración del cultivo de referencia por un coeficiente de estrés hídrico “K”. El valor de “K” depende del tipo de cultivo, variedad y etapa de crecimiento. Para llevar a cabo la estimación de los métodos que se mencionan en la Tabla 1 se requiere de una base de datos meteorológicos (FAO, 2006; Ahmad *et al.*, 2017).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) en la Estación Meteorológica Almaraz, se utilizaron los métodos de Thornthwaite y el método del Tanque de evaporación “Tipo A”, los cuales se describen a continuación.

a) Thornthwaite: El método de Thornthwaite (1948) determina la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección acorde a la duración del día y el número de días correspondiente al mes. El autor comprobó que la evapotranspiración es proporcional a la temperatura media afectada por un coeficiente exponencial y un índice de calor mensual (Almorox, s/f; Martín *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2017).

Para obtener el índice de calor mensual a partir de las temperaturas medias diarias del aire, por medio de la siguiente fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

El índice de calor anual ( $I$ ) es el resultado de la adición de los doce valores del índice de calor mensual ( $i$ ) de los meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol.

Con base en los datos generados se plantea la siguiente fórmula:

$$e = 1.6 (10 tm/i)^a$$

Donde

$e$  = Evapotranspiración potencial mensual sin ajustar en mm/día

$tm$  = temperatura media mensual en °C

$i$  = índice de calor mensual.

$I$  = índice de calor anual.

$a$  = coeficiente exponencial de ajuste

$a = 675x10^{-9}I^3 - 771x10^{-7}I^2 + 1.972x10^{-5}I + 0.49239^3$  (Almorox, s/f; Montaner y Sánchez, 1988; Martín *et al.*, 2015).

Para corregir el valor de la evapotranspiración, se multiplica por el coeficiente de corrección F (índice de iluminación mensual), este varía de acuerdo con la latitud; número de horas de sol y con el mes; número de días del mes. De tal forma que F se calcula:

$$F = \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{d}{30}\right) * d$$

Donde

F= índice de iluminación mensual.

N = número máximo de horas de sol según la latitud de lugar.

d = número de días del mes en cuestión.

Por tanto, la evapotranspiración potencial para un lugar dado según el método de Thornthwaite es (Manzano, 2008; Pérez *et al.*, 2017):

$$ETP = F * e$$

b) Tanque de evaporación “Tipo A”: Es un método indirecto para determinar la necesidad hídrica de un cultivo, mediante el uso de un tanque de evaporación, en vista que es una analogía de una superficie vegetal. Este tiene una respuesta similar a la evaporación de los suelos y vegetación, ya que los valores que proporciona el tanque es efecto de la radiación, velocidad del viento, temperatura y humedad sobre la superficie de agua y existe una relación de la cantidad de agua necesitada de un cultivo con la que se evapora de dicho tanque, principalmente en cultivos anuales y frutales (Millar, 1993).

Los estudios realizados por Chávez (1973), citado por Aguilera y Martínez (1990) en Arizona mostraron coeficientes de ajuste de la fórmula que se utiliza para la estimación de la evaporación potencial, como función de la evaporación medida en el tanque (Rodríguez, 2014).

$$ETP = C * EV$$

Donde

ETP = evapotranspiración (mm/día)

C = coeficiente del tanque evaporímetro (-)

EV = evaporación del tanque evaporímetro (mm/día) (FAO, 2006).



De acuerdo con el manual de la FAO 24, si el tanque está rodeado por cultivos, el coeficiente de tanque se puede calcular como:

$$K_p = 0.108 - 0.0286 U + 0.0422 \ln(X) + 0.1434 \ln(RH) - 0.000631 [\ln(X)^2] \ln(RH)$$

Donde:

$K_p$  = coeficiente del tanque.

$U$ : es la velocidad del viento (m/s) a 2 m de altura

$X$ : es la distancia (m) con cultivos alrededor del tanque

$RH$ : humedad relativa media

Si el tanque se encuentra en un suelo desnudo o seco el coeficiente del tanque se calcula como (Villalobos y Fereres, 2017):

$$K_p = 0.61 + RH(0.00341 - 0.000162U) + U[0.00327 \ln(X) - 9.59 \cdot 10^{-6} X] \\ + [4.459 + \ln(U)][-0.0106 \ln(X) + 0.00063 [\ln(X)]^2 - 0.00289U]$$

El “coeficiente del tanque o coeficiente  $C$ ” es una fracción de la evaporación del tanque, que hace referencia a la evaporación del cultivo, este está sujeto a diversos factores como el tamaño, forma, color y estado de conservación del tanque (Cisneros, 2003). A su vez, la estimación del coeficiente puede variar, se le atribuye a la ubicación del tanque y/o el medio que lo rodea (Palacios 1977 citado por Aguilera y Martínez, 1990).

Aguilera y Martínez (1990) determinaron valores del coeficiente  $C$  (Tabla 2) de acuerdo con los factores involucrados mencionados anteriormente.

**Tabla 2. Coeficiente de ajuste “C” para estimar la evapotranspiración potencial en función de la evaporación medida del tanque tipo A (Cisneros, 2003).**

<b>Tanque rodeado de vegetación o cultivo</b>				
<b>Viento (km d<sup>-1</sup>)</b>	<b>Radio de la cubierta (m)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>		
		<b>Baja &lt; 40</b>	<b>Medio 40-70</b>	<b>Alto &gt; 70</b>
Ligero < 175 km d <sup>-1</sup>	0	0.55	0.65	0.75
	10	0.65	0.75	0.85
	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
Moderado 175–425 km d <sup>-1</sup>	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.60	0.70	0.75
	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
Fuerte 425-700 km d <sup>-1</sup>	0	0.45	0.50	0.60
	10	0.55	0.60	0.65
	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
Muy fuerte > 700 km d <sup>-1</sup>	0	0.40	0.45	0.50
	10	0.45	0.55	0.60
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65
<b>Tanque rodeado de tierra seca</b>				
<b>Viento (km d<sup>-1</sup>)</b>	<b>Radio del área desnuda (m)</b>	<b>Humedad relativa media (%)</b>		
		<b>Bajo &lt; 40</b>	<b>Medio 40-70</b>	<b>Alto &gt; 70</b>
Ligero < 175 km d <sup>-1</sup>	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.50	0.60	0.70
Moderado 175 - 425 km d <sup>-1</sup>	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.55	0.60	0.70
	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.45	0.55	0.60
Fuerte 425-700 km d <sup>-1</sup>	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.40	0.45	0.55
Muy fuerte > 700 km d <sup>-1</sup>	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.35	0.40	0.45

La descripción del tanque de evaporación clase “A”, tiene un diámetro de 1.27 m, 25 cm de profundidad, con un tornillo micrométrico para medir el nivel del agua con precisión, el tanque se posiciona sobre una plataforma que se encuentra a 15 cm por encima del nivel del suelo, nivelado, al lado del tanque debe existir un pluviómetro para realizar las mediciones. A partir de estas se obtiene un valor equivalente de ETP, multiplicado por un coeficiente del tanque (Tabla 2) (Allen *et al.*, 2006 citado por Sánchez, s/f).

### 2.2.2. Índices térmicos

Los índices térmicos dirigen la variación anual de la actividad biológica y constituyen un auténtico factor limitante cuando sobrepasan ciertos valores, en cuanto a unidades calor, horas frío o heladas con respecto a la especie vegetal en manejo, ya que afecta la velocidad de los procesos metabólicos y/o bioquímicos como la respiración, fotosíntesis, actividad enzimática, división y crecimiento celular, entre otros (Mercado, 2020). Como se ha mencionado anteriormente, la temperatura condiciona el hecho que un cultivo pueda o no desarrollarse (Hernández y Medina, 2012). Las temperaturas bajas retardan el desarrollo, en tanto a las altas temperaturas, aceleran y acortan el ciclo vegetativo afectando la producción y rendimiento. A continuación, se describen los índices evaluados en este trabajo.

#### 2.2.2.1. Unidades calor

La temperatura y el fotoperiodo influyen en el desarrollo de los cultivos. Las unidades calor (UC) o grados días (GD) se refieren como la integración de la curva de temperatura ambiental entre la temperatura máxima y crítica mínima sobre el ciclo vegetativo que comprende un cultivo o a una etapa de éste (Hernández y Medina, 2012; Mercado, 2020).

Las unidades calor están presentes en la germinación o maduración, para esta primera, son constantes que se calculan multiplicando la diferencia de temperatura entre la temperatura media menos el punto crítico o umbral para la germinación durante el número de días del período de germinación. Las unidades calor para la madurez son la cantidad de calor que el cultivo tiene que acumular desde que se siembra hasta alcanzar la madurez (Hernández y Medina, 2012).

Algunas especies vegetativas ya cuentan con valores fijos determinados de UC con respecto a su etapa de desarrollo hasta alcanzar la madurez, lo que permite estimar la duración de cada etapa fenológica y predecir su momento de madurez fisiológica (Mercado, 2020).

Las principales aplicaciones que se pueden realizar conociendo las unidades calor son:

- Establecimiento de nuevas variedades vegetales, de acuerdo con las U.C disponibles de la región.
- Determinación de fechas de siembra.
- Pronóstico de las fases fenológicas del cultivo.
- Medición y estudio de las etapas fenológicas.
- Uso en el Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (Mercado, 2020).

Para el cálculo de las UC se emplea el método Residual, para ello se toman en cuenta las temperaturas mayores al cero vital y mediante la suma de residuos de obtiene la Constante Térmica. El cero vital o temperatura base es el nivel térmico de una especie determinada comienza a crecer y por debajo del cual no se puede desarrollar (Hernández y Medina, 2012; Mercado, 2020;).

El método residual tiene una temperatura base de 10 °C y una temperatura máxima de 30 °C. En caso de producirse temperaturas máximas superiores a 30 °C, se tomarán como iguales a 30 °C. Para calcular las UC, se emplea la siguiente fórmula:

$$TT_{10} = 0.5 (TM + Tm) - Tb$$

Donde

$TT_{10}$  = valor diario de la temperatura

TM = temperatura máxima

Tm = temperatura mínima

Tb = temperatura base mínima (10 °C) (Hernández y Medina, 2012)

#### 2.2.2.2. Horas frío

Las bajas temperaturas no siempre tienen efectos negativos en especies vegetativas, para ciertas especies como los cereales de invierno y los árboles frutales caducifolios requieren acumular cierta cantidad de horas frío en un periodo de latencia en su ciclo anual, esto posibilita los cambios fisiológicos responsables de la floración y fructificación normal del cultivo (Hernández y Medina, 2012; Mercado, 2020).

El periodo de latencia produce cambios en el metabolismo y crecimiento de las especies frutales, por lo que primero deben estar expuestas a bajas temperaturas, en el periodo considerado como acumulación de frío, y luego a temperaturas moderadas, periodo de acumulación de calor. Estas dos etapas significativas reciben el nombre de endodormancia y ecodormancia (Lang *et al.*, 1987 citado por De Paz, 2020).

Bajo condiciones adversas para su supervivencia, se refiere a que cuando una planta se encuentra en:

- Latencia: etapa en el desarrollo o vida de la planta y se caracteriza por dos conceptos: no crecimiento y lento metabolismo, consecuente del ambiente adverso.
- Letargo: condición de la planta en las que sus estructuras, por ejemplo, las yemas, no muestran crecimiento y se hayan en reposo.
- Dormancia: para los frutales caducifolios, durante el invierno cualquier estructura vegetal que contenga un meristemo, como, yemas, ápices o embrión, entran en la suspensión temporal del crecimiento y el metabolismo se vuelve lento.
- Ecodormancia: causada por algún estrés ambiental que provoca respuestas no específicas, sinónimo de quiescencia y reposo.
- Endodormancia: resultado de factores fisiológicos que ocurren dentro del meristemo, se considera sinónimo de latencia innata e impuesta.
- Vernalización: es la necesidad de temperaturas bajas para desencadenar los procesos de desarrollo para la adquisición o la aceleración de la capacidad de florecer por efecto de un tratamiento de frío, en otras palabras, la adaptación para evitar la floración prematura. (Chouard, 1960; Lang *et al.*, 1987 citado por De Paz, 2020).
-

En agricultura, se ha aceptado umbrales de 4 a 5 °C para cereales de invierno y de 6 a 7 °C para frutales caducifolios. Sin embargo, se conoce por hora frío aquella cuya temperatura está por debajo de los 7 °C (Hernández y Medina, 2012; Mercado, 2020).

Factores que generan impacto en la modificación del cálculo de horas frío:

- Alta oscilación diaria de la temperatura.
- Desorden estacional en la presencia de bajas temperaturas.
- Presencia de unidades calor durante el invierno.
- Gran radiación solar y ausencia de nubosidad.
- Poca humedad ambiental y edáfica.
- Presencia de vientos cálidos.
- Fotoperiodismo correspondiente a baja latitud.
- Suelos arenosos de color claro (Mercado, 2020).

En la presencia de cambios climáticos radicales es necesario contabilizar correctamente las horas frío para determinar la variedad que mejor se adapta a la región determinada por sus características edafoclimáticas, de lo contrario se presentan diversas consecuencias en los frutales. Entre las más relevantes se pueden encontrar (Hernández y Medina, 2012):

- Prolongación del periodo de reposo.
- Irregularidad en el rompimiento del reposo.
- Retraso de la brotación de órganos vegetativos, lo que ocasiona que el fruto se aborte en otras palabras, tienden a caer tempranamente por la falta de asimilación de nutrimentos en la planta.
- Si las horas frío son superiores a lo recomendado se presentan posibles riesgos de heladas en época de floración.
- Si las horas frío son inferiores a las necesarias existe un mal desarrollo de flor, de fruto y una escasa brotación.
- Floración raquílica e irregular.
- Inhibición de yemas florales y foliares.
- Brotación excesiva en yemas de madera obsoleta.
- Presencia de entre nudos cortos y follaje en roseta.

Para la resolución de estos problemas, se invertirá en hormonas vegetales para contrarrestar los efectos de la deficiencia de horas frío (Hernández y Medina, 2012; Fertibox, 2020; Mercado, 2020).

Existen diferentes modelos que predicen la ruptura del reposo, empleando métodos matemáticos tomando en cuenta datos históricos de temperaturas de los últimos años. Entre los principales métodos se tienen:

- a) Métodos directos.
  - Método del huerto fenológico.
  - Método del termógrafo
- b) Métodos indirectos.
  - Método de F.S Da Mota
  - Método del Dr. Weinberger
  - Método de Crossa-Raynaud
  - Método del Dr. Sharpe

Para el cálculo de las horas frío del presente trabajo, con los datos obtenidos de la estación meteorológica Almaraz se utilizaron los métodos:

- Método de F.S Da Mota (1979)
- Método del Dr. Weinberger (1956)

a) El Método de F.S Da Mota es uno de los más utilizados, fue ideado en Brasil y se utiliza la temperatura media mensual de los meses de noviembre a febrero. La fórmula correspondiente es (Hernández y Medina, 2012):

$$H. F. = 485.1 - 28.52x$$

Donde:

H.F. = Horas frío

x= Temperatura media mensual

485.1 = Intercepto de la línea de regresión con el eje de las Y

-28.52 = Pendiente de la línea de regresión.

b) El Dr. Weinberger, hizo una estimación de las horas inferiores a 7 °C con respecto a las temperaturas medias de los meses de diciembre y enero. Basta comparar la temperatura media combinada, para obtener una estimación del número de horas frío acumuladas (Anexo 2).

Asimismo, de acuerdo con la afinidad entre el número de horas frío y el promedio de temperaturas medias entre los meses de diciembre y enero, se puede emplear la siguiente fórmula:

$$H. F. = 2124.85 - 125.23T$$

Donde

H.F. = horas frío acumuladas.

T = promedio de temperaturas medias de diciembre y enero (°C) (Mercado, 2020).

#### 2.2.2.3. Probabilidad de ocurrencia de helada

Desde el punto de vista meteorológico, se considera helada cuando la temperatura desciende por debajo o igual a 0 °C, desde el punto de vista agronómico, se considera helada cuando la temperatura desciende a niveles que pueden ocasionar daño a una parte, a un órgano o a toda la planta. Las temperaturas pueden oscilar entre los 2 y 4 °C depende del tipo del cultivo agrícola, de su etapa de desarrollo y del tiempo que permanezcan las bajas temperaturas (Romo y Arteaga, 1989; Hernández y Medina, 2012).

Las heladas se clasifican: por su época de ocurrencia, por su proceso físico y por los efectos visuales (Hernández y Medina, 2012).

Por su ocurrencia son:

- a) Primaverales (tardías)
- b) Invernales
- c) Otoñales (tempranas)



Por el proceso físico que las origina son:

- a) Advección
- b) Radiación
- c) Mixtas
- d) Evaporación

Por efectos visuales:

- a) Blancas
- b) Negras

Estimar la probabilidad de ocurrencia de heladas, ayuda a aminorar el riesgo de pérdidas de la producción agrícola, y poder desarrollar mejores estrategias y técnicas para contrarrestar el efecto negativo (Medina *et al.*, 2008 citado por Rodríguez, 2014).

Los principales métodos para estimar la ocurrencia de heladas son:

- a) Distribución acumulativa
- b) Distribución normal
- c) Método de D.S Da Mota (1977).
- d) Método de Pájaro y Ortiz (1988).
- e) Método de Arteaga (1988).

La estimación de la ocurrencia de heladas en el presente estudio, se utilizaron los métodos de Da Mota, Distribución normal, Método de Pájaro y Ortiz, y el método de Arteaga.

a) Método de F.S Da Mota: la probabilidad de ocurrencia de una helada se estima con la última fecha de la primavera o la primera fecha de otoño, está dada por la fórmula estipulada por Da Mota y que se presenta a continuación:

$$P = CI, \quad \text{donde } I = \frac{m + 1 - x}{m + 1} \quad C = m/n$$

Donde:

P= probabilidad de ocurrencia de helada

C= constante

I= Índice de cálculo

n= número de años estudiados

m= número de años con heladas

x= número de orden de las fechas de ocurrencia en creciente (Rodríguez, 2014).

b) Distribución normal: este método es adecuado cuando existen varios años con registro de temperatura, para mensurar la fecha de la primera y última helada (Medina *et al.*, 2008).

Para estandarizar cada uno de los datos de la primera como de la última helada, es necesario conocer los valores de la desviación estándar muestral y media, para después sustituirlos en la fórmula siguiente:

$$Z = (X - \mu)/S$$

Donde:

Z= probabilidad normal

X = dato codificado

$\mu$  = media

S = desviación estándar muestral

Con los valores de Z así calculados para cada dato, se entra a la Tabla de Probabilidad (Anexo 4) de hallar un valor al azar de Z, y se encuentra la probabilidad de primera y última helada. Una vez determinadas las probabilidades se grafican los datos.

Es importante señalar que, para los valores de Z tabulados negativos, el valor de Z encontrado en la tabla de probabilidad se expresa en porcentaje y se resta a 100 para encontrar la probabilidad de la última helada codificada.

Para el caso de primera helada, si el valor de Z tabulada es positivo, el valor de Z se expresa en porcentaje y se resta a 100 para tener la probabilidad de ocurrencia en la fecha codificada.

Para los casos contrarios, en los cálculos de primera y última helada se expresan los valores de Z de tablas directamente en porcentaje y tener así la probabilidad de ocurrencia de la fecha correspondiente (Mercado, 2020).

c) Método de Arteaga: Este método hace uso de los valores de las temperaturas mínimas promedio, para calcular el 20% de probabilidad de ocurrencia de una última helada después de una determinada fecha.

Con los datos de temperatura mínima promedio mensual se construye una gráfica, se traza una línea horizontal que atraviesa en los 7 °C de temperatura mínima y al interceptar la gráfica construida, las ordenadas de las intercepciones pertenecen a la fecha de la última helada con 20% de probabilidad de ocurrencia y la otra fecha corresponde al 20% de probabilidad que se presente la primera helada (Mercado, 2020).

d) Método de Pájaro y Ortiz: Para emplear este método, los autores mencionan que se requiere la información sobre el número de días con heladas en el mes y graficar estos valores. En el eje de las X corresponde a los meses del año, en las Y al número de días con heladas totales acumuladas de cada mes, de tal manera que es posible obtener una gráfica en alusión a la información (Pájaro y Ortiz, 1988).

En dicha gráfica se entra con dos días con heladas para el primer semestre del año y con 0.8 días con helada para el segundo semestre, la interceptar la gráfica construida, la ordenada de la intercepción corresponde a la fecha, en que existe una probabilidad de 12.1% y 11.7% de ocurrencia de helada, respectivamente (Romo y Arteaga, 1989).

### 2.2.3. Índices hídricos

Los recursos hídricos disponibles en una región agrícola son la base de una buena planificación, sin embargo, los requerimientos para los cultivos varían, temporal y espacialmente con respecto a las condiciones ambientales, a el manejo de la tierra y cultivo, a la fase de crecimiento y a la variedad del cultivo, entre otros aspectos. La lluvia es principalmente la variable climática que se estudia en las ciencias agrícolas (Doorenbos y Pruitt, 1977 citado por Íñiguez *et al.*, 2014; Garduño, 1994 citado por Mercado *et al.*, 2014).

### 2.2.3.1. Probabilidad de ocurrencia de lluvia

Una precipitación denota a todas las formas líquidas o gaseosas que llegan a la tierra desde la atmósfera. Las precipitaciones incluyen lluvia, llovizna, granizo o nieve. Esta última y la lluvia aportan una cantidad significativa de agua a la superficie terrestre (Ahmad *et al.*, 2017).

La importancia de la disponibilidad de agua en el suelo permite controlar las reacciones químicas involucradas en el crecimiento de la planta, de igual manera que la solubilidad de minerales, absorción de nutrimentos y gases, y varios procesos fisiológicos (Ortiz, 1987 citado por Mercado *et al.*, 2014)

Para caracterizar las variables es necesario determinar el inicio de la precipitación, duración, termino y la cantidad de ésta, con la intención de precisar su magnitud en la agricultura bajo condiciones de temporal y la vulnerabilidad que pueda presentar, por lo que demanda el conocimiento las variables de la estación húmeda del ciclo productivo (García, 2003 citado por Íñiguez *et al.*, 2014)

Para definir el inicio y fin de temporada de lluvias existen dos enfoques a considerar. El primero se caracteriza por el balance diario de humedad del suelo, lo que permite el diseño de una calendarización de riego y definir el impacto de la distribución de la lluvia, y así generar condiciones favorables para los cultivos que presentan variabilidad en el periodo de lluvia.

El segundo trabaja en función de indicadores climáticos, relacionados con la lluvia acumulada observada de uno o más días (Arteaga *et al.*, 2006; García y Cruz, 2008; Ojeda, *et al.*, 2012). Se utilizan indicadores pluviométricos para definir el periodo de lluvias (Íñiguez *et al.*, 2014).

La probabilidad de lluvia es definida como la cantidad de lluvia en un periodo breve o largo de tiempo, se expresa en milímetros (mm) principalmente con relación a la profundidad del área de recolecta, o también en ( $m\ h^{-1}$ ), ( $cm\ h^{-1}$ ), ( $mm\ h^{-1}$ ), asimismo, como la frecuencia que es captada ya sea en un volumen superior o inferior a ella, la cual se puede considerar una vez cada tres años, cada cinco años, o diferentes periodos, estos tienen una duración de tiempo de horas o minutos, y debido a su tendencia irregular es de vital importancia calcular esta probabilidad para la planeación agrícola. Esto implica un análisis estadístico detallado con el fin de caracterizar la lluvia en alguna dimensión y con el cálculo de su probabilidad se puede tener las siguientes aplicaciones: estimar fechas de siembra, cantidad mínima de lluvia durante la etapa más crítica de un cultivo, estimar

fecha de cosecha en áreas lluviosas, estimar el éxito de una práctica de producción (dosis de fertilizante, labranza, entre otros) (Ahmad *et al.*, 2017).

Para hacer uso de los registros meteorológicos en una estación, se verifica la continuidad de los datos obtenidos, ya que pueden existir cierta inexactitud en los mismos datos debido a fallas de la instrumentación, ausencia del observador, entre otros (Ahmad *et al.*, 2017).

En este trabajo, los métodos que se utilizaron para obtener la probabilidad de ocurrencia de lluvia fueron, la Distribución acumulada y la Distribución normal.

a) Distribución acumulada consta en ordenar los datos de mayor a menor. Seguidamente se le asigna su número de orden, posteriormente se sustituyen los valores en la siguiente fórmula:

$$P = \frac{K}{n} + 1$$

Donde:

P = probabilidad

K = número de orden

n = número de años estudiados

Con los valores obtenidos se grafican y a partir de esta se calcula la probabilidad de lluvias (Mercado *et al.*, 2014).

b) Distribución normal: esta fórmula fue detallada anteriormente, de manera que es necesario conocer la desviación estándar y la media de los datos, posterior se hace uso de la fórmula mencionada para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de lluvia:

$$Z = \frac{X - \mu}{s}$$

Se ordenan los datos de mayor a menor y se calcula Z. Con este valor se entra a la tabla de probabilidades para calcular la probabilidad de hallar un valor al azar de Z. Cabe señalar que, para valores negativos de Z tabulada, el valor encontrado en la tabla se expresa en porcentaje y se resta de 100 para así obtener la probabilidad de ocurrencia del valor en cuestión.

Para valores positivos de Z tabulada, el valor de la tabla se expresa en porcentaje y es el valor directo de la probabilidad de lluvia.

#### 2.2.3.2. Estación de crecimiento

La estación de crecimiento describe un ciclo que presenta condiciones climáticas favorables para que un cultivo desarrolle sus etapas fenológicas e identificar la zonificación agroecológica de este (Laguna, 2017). No obstante, en este periodo se presentan condiciones no favorables, como; periodos muy húmedos o secos, lo que provoca que se alargue o retrase las correspondientes etapas. Frére y Popov (1980) designan que la estación de crecimiento es el período en que el agua está a libre disposición para los cultivos, ya que se mantiene un equilibrio con las precipitaciones y con el agua acaparada en el terreno (INIFAP, 2014).

Day (1911) citado por Grassi (1983), hace uso del término “estación de crecimiento”, para el número días entre la fecha promedio de la última helada en primavera y la primera helada en otoño (Laguna, 2017).

La FAO (1997) definió a la estación de crecimiento (EC) como el periodo del año donde las condiciones de humedad y temperatura son ideales para el desarrollo y crecimiento de los cultivos (INIFAP, 2014), generando un marco referencial de las variables climáticas, que se puedan asemejar a los requerimientos y/o estimaciones del cultivo (Laguna, 2017).

En sistemas productivos agrícolas anuales bajo condiciones de temporal, la estación de crecimiento comienza con el periodo de lluvias, que son encargadas de la activación de las reservas nutricionales para llevar a cabo la germinación, ya que generalmente al inicio de la estación de crecimiento existe un gran déficit de humedad en el perfil del suelo, por lo que dependen de la cantidad y distribución pluvial (Laguna, 2017). Durante el periodo de la EC, el comportamiento de la precipitación es mayor que la mitad de la evapotranspiración potencial ( $P > 0.5$  ETP) y finaliza en ausencia de lluvias o por la presencia de una helada temprana (INIFAP, 2014).

En cultivos perennes, la estación de crecimiento da inicio cuando el suelo que rodea la raíz se encuentra suficientemente húmedo y presenta altas temperaturas. En el caso de cultivos bianuales, requieren de dos estaciones de crecimiento con una combinación de temperatura y humedad favorable (Lowry, 1980 citado por INIFAP, 2014).

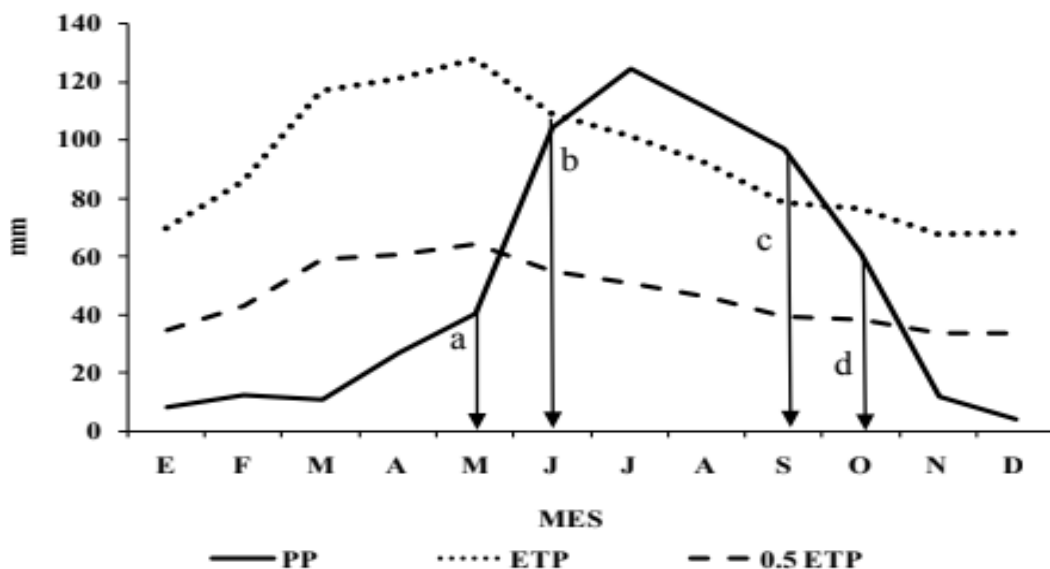
El periodo de crecimiento puede ser dividido en las siguientes partes: período de crecimiento térmico y período de crecimiento húmedo; la sobreposición de estos dos períodos da como resultado el período de crecimiento efectivo (Crespo, 2009 citado por INIFAP, 2014).

En ciertas ocasiones el periodo de crecimiento es persistente de la estación lluviosa, mediante el contenido de reservas de humedad almacenadas al alcanzar la maduración del cultivo, en el perfil del suelo. De manera que, debe considerarse el almacenamiento de humedad del suelo un determinante en la duración del periodo de crecimiento (Laguna, 2017).

El método utilizado en este trabajo fue el de la FAO (1997) y se comparó su duración con el periodo de bajo riesgo de helada.

La FAO (1997), en su proyecto de zonas agroecológicas utilizó a la evapotranspiración potencial (ETP) en la definición de los periodos de crecimiento. Por periodo de crecimiento se considera la época del año en que las condiciones de humedad y temperaturas son idóneas para la producción del cultivo.

Para precisar el periodo de crecimiento por disponibilidad de humedad se identifican componentes del periodo de crecimiento en la Figura 1.



**Figura 1. Componentes de la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad (FAO, 1997).**

Donde:

- a) Inicio del periodo de crecimiento. Su determinación se basa en el inicio de la estación de las lluvias, momento en el que las precipitaciones son iguales o superiores a la mitad de la evapotranspiración potencial ( $P \geq 0.5$  ETP), de manera que, las lluvias son suficientes para satisfacer las exigencias hídricas de los cultivos en su fase inicial.
- b) Periodo húmedo. Da comienzo cuando las precipitaciones son superiores a la evapotranspiración potencial ( $P > \text{ETP}$ ). Este periodo es incluido dentro de un periodo normal de crecimiento. Durante este lapso, no solo es posible satisfacer plenamente la demanda de evapotranspiración de las plantas con su parte área desarrollada completamente o al máximo sino además, responder al déficit de humedad del perfil del suelo.
- c) Final de las lluvias. Se considera como el momento después del periodo húmedo, en que la precipitación es igual a 0.5 ETP. Esto se aprecia cuando la frecuencia y cantidad de las precipitaciones disminuye notablemente y aumenta el déficit de precipitaciones, lo cual determina una clara alteración del ambiente que a su vez origina visibles cambios en las respuestas fisiológicas de los cultivos, además de que se ven obligados a madurar con precipitaciones iguales a 0.5 ETP o menores.
- d) Final del periodo de crecimiento. El final de éste corresponde con la determinación de la estación de lluvias ( $P = 0.5$  ETP). Al definir la longitud del periodo de crecimiento hay que tener en cuenta el agua almacenada en el suelo. El periodo de crecimiento de la mayoría de los cultivos continua después de la estación de lluvias y, en mayor o menor grado, los cultivos maduran normalmente aprovechando las reservas de humedad acumuladas en el perfil del suelo (Rodríguez, 2014).

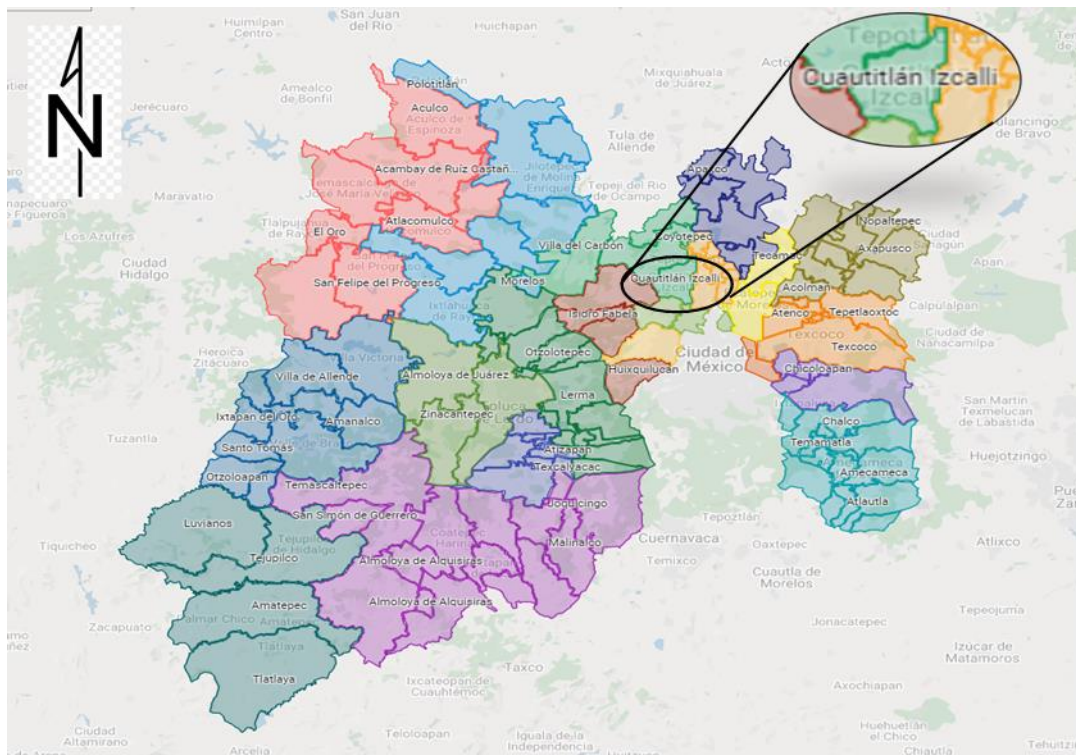


### 2.3. Descripción del área de estudio

A continuación, se describen las condiciones del área de estudio.

#### 2.3.1. Localización geográfica

El área de estudio se encuentra en el municipio de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México (Figura 2). El sitio de observación se ubica en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C), en la parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA) (Figura 3).



**Figura 2. Localización geográfica del Municipio de Cuautitlán Izcalli. México (Gobierno del Estado de México, 2022).**



**Figura 3. Parcela 14 del Centro de Enseñanza Agropecuaria (Google Earth, 2022).**

### 2.3.2. Características edafoclimáticas

La zona se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias de verano, una temperatura promedio de 15.2 °C; una precipitación promedio de 637.6 mm y la presencia de heladas en la época de invierno (Rodríguez, 2014).

El suelo es de textura arcillosa, con un porcentaje de materia orgánica de 3.4%; pH de 6.7; conductividad eléctrica de 0.619 dS m<sup>-1</sup>; y fertilidad mediana a alta (Mercado, 2013).

### 2.3.3. Localización y descripción de la Estación Meteorológica Almaraz

La Estación Meteorológica Almaraz se encuentra ubicada en la parcela No 14, en la FES-C, en una superficie de 152 m<sup>2</sup> (Figura 4). Se localiza en la Longitud Oeste de 99°11'42" y en la Latitud Norte de 19°41'35", a una altura de 2, 256 msnm.



**Figura 4. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

La estación meteorológica Almaraz cuenta con instrumental convencional, de lectura directa y de registro, así como de una estación meteorológica automática. Inició su trabajo en 1981; sin embargo, es hasta 1987 cuando se comienza a registrar los datos climáticos de manera ordenada, sistematizada en una base de datos, que permiten el acceso a un concentrado de datos diarios.

La instalación de la estación se basó en los lineamientos que la Organización Meteorológica Mundial que establece, entre otros aspectos: contar con abrigos meteorológicos orientados al Norte y a 1.5 m de altura; la infraestructura pintada de blanco; cercada; emplazada en un predio legalmente constituido; de fácil acceso para el observador; los obstáculos más cercanos se encuentran a 400 metros de distancia de la estación; el suelo cubierto de pasto; y con personal capacitado para la toma de datos.

En ella se realizan observaciones instrumentales de los elementos del clima, así como, observaciones sensoriales, sobre la presencia de diversos fenómenos meteorológicos, diariamente, en una rutina de trabajo de cada tres horas. Sin embargo, cuando se observa la presencia de algún fenómeno meteorológico fuera de la hora de observación, se anota su presencia en la hoja de registro correspondiente.

El equipo e instrumental con que cuenta la estación meteorológica es:

1. Temperatura:

- a) Termómetro de mínima modelo Rutherford.
- b) Termómetro de máxima modelo Negretti.
- c) Termómetro de mercurio para el suelo.
- d) Termógrafo.

2. Humedad Atmosférica:

- a) Psicrómetro de onda.
- b) Psicrómetro de ventilación natural.
- c) Higrógrafo.

3. Presión Atmosférica:

- a) Barómetro de mercurio tipo Fortín.
- b) Barógrafo.

4. Precipitación:

- a) Pluviómetro.
- b) Pluviógrafo.

5. Evaporación:

- a) Tanque de evaporación “tipo A”.

6. Viento:

- a) Anemógrafos a 2.0, 4.0 y 6.0 m de altura.
- b) Anemómetro totalizador a nivel del Tanque de evaporación.
- c) Velea para determinar su dirección de acuerdo con la rosa de los vientos.

7. Insolación:

- a) Heliógrafo tipo Campbell-Stokes.

8. Radiación solar:

- a) Actinógrafo tipo Robisztsch.



9. Estación automática marca Campbell Scientific (Figura 5), que registra la temperatura, humedad, presión atmosférica, radiación solar, dirección y velocidad del viento, y precipitación, con intervalos de cada 10 minutos.



**Figura 5. Estación meteorológica automática, Cuautitlán Izcalli. México.**

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Metodología

Los datos utilizados en el presente trabajo fueron capturados durante el periodo de julio de 1987 a febrero de 2022, en la estación meteorológica Almaraz, considerando datos de promedios mensuales y totales anuales de: marcha de la temperatura; temperatura mínima a la intemperie a 20, 40, 60, 80 y 100 cm del suelo, evaporación, presión atmosférica, precipitación, humedad atmosférica, viento, radiación solar, horas de insolación, temperatura del suelo a 10, 20 y 50 cm, nubosidad, número de días con nubosidad, número de días con lluvia apreciable, número de días con lluvia inapreciable, número de días con rocío, número de días con tormentas eléctricas, número de días con heladas, número de días con granizo, número de días con niebla.

##### 3.1.1. Métodos utilizados

Los métodos que se utilizaron para calcular las variables agroclimáticas fueron:

- a) Evapotranspiración (ETP): Método de Thornthwaite y el Tanque de evaporación “Tipo A”.
- b) Unidades Térmicas (U.T.): Método Residual.
- c) Horas Frío: Método F.S Da Mota y el de Dr. Weinberger.
- d) Probabilidad de ocurrencia de lluvia: Distribución acumulada y Distribución normal.
- e) Probabilidad de ocurrencia de helada: Da Mota, Distribución normal, Método de Pájaro y Ortiz, y el método de Arteaga.
- f) Estación de Crecimiento: Método de la FAO (1977) y periodo de bajo riesgo de helada obtenido por el método de distribución normal.

##### 3.1.2. Variables climáticas

Las variables climáticas que se evaluaron fueron las siguientes:

- Marcha de la temperatura: Se consideraron los valores mínimos, medios y máximos promedio de cada mes de toda la serie de datos analizados.

- Temperatura mínima a la intemperie: Los datos fueron registrados a 20, 40, 60, 80 y 100 cm de altura del suelo, obteniendo su promedio mensual y expresado en grados centígrados.
- Evaporación: Los datos se procesaron para obtener el promedio mensual, expresado en mm.
- Precipitación (pp): Se realizaron las sumatorias para obtener el total y a su vez los promedios mensuales, expresados en mm.
- Humedad atmosférica: Los datos considerados fueron: la humedad relativa máxima, mínima y media, promedio mensual, expresada en porcentaje.
- Viento: Los valores se calcularon con base al recorrido del viento promedio mensual a 0.3, 2.0, 4.0 y 6.0 m del suelo, expresados en  $m\ día^{-1}$ .
- Radiación solar: Se calculó con base al método de Armstrong, utilizando los datos de insolación a nivel diario para obtener los valores promedio mensual, expresados en  $cal\ cm\ día^{-1}$ .
- Insolación: Se cuantificaron las horas de insolación diarias para obtener el promedio mensual.
- Temperatura del suelo: Se consideraron los valores registrados a diversas profundidades del suelo: 10, 20 y 50 cm; y se obtuvieron los valores promedio mensuales, expresados en grados centígrados, en dos perfiles de suelo (tepetate y arcilla).
- Presión atmosférica: Se refirieron los datos de presión atmosférica máxima, mínima y media; para obtener su promedio mensual, expresado en mmHg.
- Nubosidad: Se consideraron los valores promedio mensuales medidos en octas.
- Número de días con nubosidad: Se cuantificaron los días y meses, de la serie de 34 años con presencia de cielos, despejados, medio nublados y nublados en:
  - a) Cielo despejado = 0 - 3 Octas.
  - b) Cielo medio nublado = 4 - 6 Octas.
  - c) Cielo nublado = 7 - 8 Octas.
- Número de días con lluvia apreciable: Se contabilizó el número de días con lluvia apreciable por mes, esto es días con precipitación mayor o igual a 0.1 mm.

- Número de días con lluvia inapreciable: Se efectuó el conteo del número de días con lluvia inapreciable por mes, menor a 0.1 mm.
- Número de días con rocío: Se realizó la sumatoria de los días con rocío y se determinó el promedio mensual de los 34 años.
- Número de días con tormenta eléctrica: Se contabilizó el número de días con tormenta y se obtuvo un promedio mensual.
- Número de días con helada: Se realizó la sumatoria de los días con presencia de helada y se determinó un promedio mensual.
- Número de días con granizo: Se tomaron en cuenta los días que presentaron granizo, se cuantificaron y posteriormente se promediaron.
- Número de días con niebla: Se tomaron en cuenta los días que presentaron niebla, para obtener la sumatoria y posteriormente su promedio mensual.

### 3.1.3. Parámetros agroclimáticos

Para la determinación y la elaboración de las gráficas de las variables agroclimáticas se tomaron en cuenta los datos de temperatura, evaporación, helada y precipitación.

- Unidades térmicas: El método utilizado en este proyecto para determinar las unidades térmicas fue el método residual, considerando la temperatura base de 4.5, 6, 8 y 10 °C. Además, se realizó el cálculo de la acumulación en el cultivo de peral a partir de datos fenológicos obtenidos en años anteriores, desde la brotación hasta la cosecha.
- Evapotranspiración potencial: Para su estimación se utilizaron dos métodos: el método de Thornthwaite y el método de tanque de evaporación “Tipo A”, considerando el coeficiente “C” con valor de 0.75.
- Estación de crecimiento: Por disponibilidad de humedad se calculó con el método de la FAO (1978) considerando la ETP, 0.5 ETP y la pp promedio mensual. Mientras que, por disponibilidad de temperatura, se utilizó el método de distribución normal.



- Horas frío: Para el cálculo del índice de horas frío se emplearon los métodos de F. S. Da Mota y el del Dr. Weinberger.
- Probabilidad de ocurrencia de lluvia: Para estimar este índice se emplearon los métodos de distribución acumulada y de distribución normal. Asimismo, se determinó el 70% de probabilidad de ocurrencia para cada mes del año por el método de distribución normal.
- Probabilidad de ocurrencia de helada: Su estimación se realizó por los métodos de Da Mota, distribución normal, método de Pájaro y Ortiz, y el método de Arteaga.
- Fórmula climática: Se estableció con base sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por García (1973).

### 3.2. Materiales

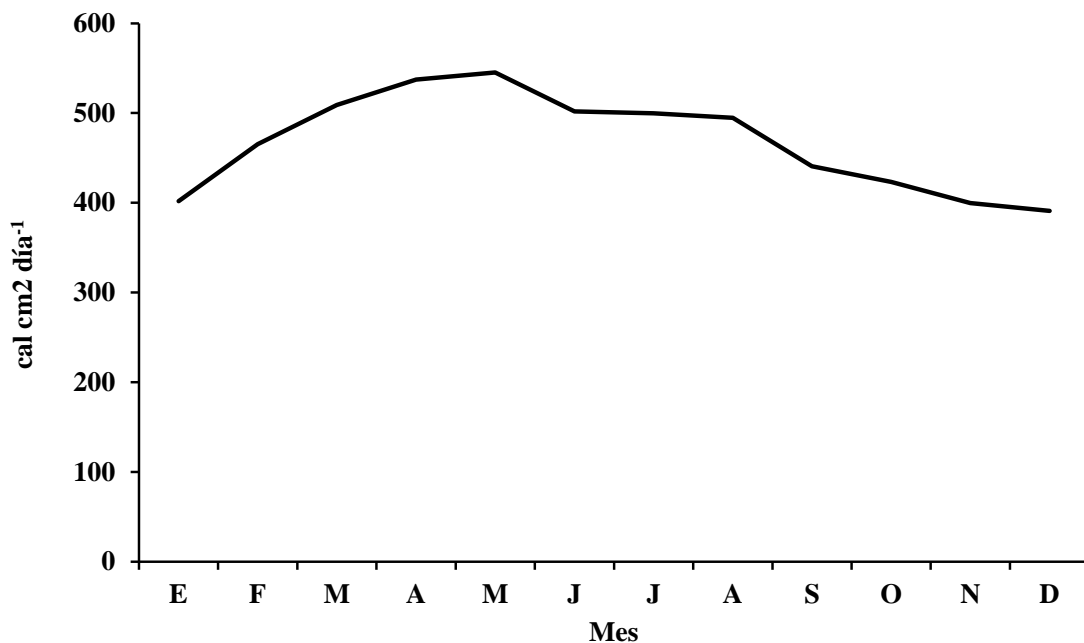
- Datos climáticos de julio de 1987 a febrero de 2022.
- Datos fenológicos del cultivo de peral de 2014 al 2021.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Anexo 3, se presentan los valores promedio mensuales de los elementos del clima obtenidos en el presente trabajo. A continuación, se describe y analiza cada uno de ellos.

##### 4.1. Variables climáticas

➤ **Radiación solar:** En la Figura 6 se muestra la tendencia de la radiación solar global promedio mensual del período 1987-2021, registrada en la estación meteorológica Almaraz. Se aprecian los valores promedio mensual más altos durante la primavera y menores valores durante el invierno.



**Figura 6. Radiación solar global (cal cm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Esta variación es resultado de la localización geográfica de la zona de estudio, latitud, longitud y elevación, asimismo la época del año y/o duración del día. Se puede observar que el mes de mayor radiación disponible en la superficie de la zona de estudio es mayo con 545.22 cal cm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>, posteriormente disminuye gradualmente desde junio a septiembre, el efecto de atenuación de la radiación solar en este periodo es resultado de la alta concentración de nubes y poca diseminación de estas, obstaculizando la entrada de ondas electromagnéticas. Se aprecia un notable descenso en

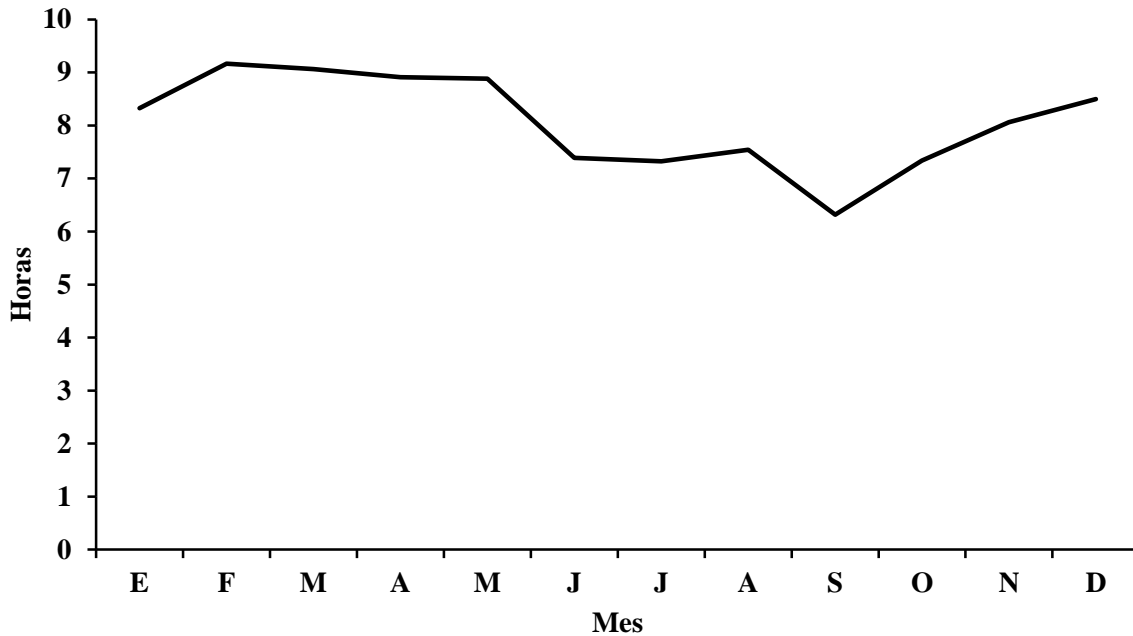
el periodo invernal, siendo diciembre el valor más bajo con un promedio mensual de  $390.95 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ , debido a que en este periodo los días son más cortos y las noches más largas. El valor promedio anual fue de  $467.47 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ .

Al comparar los datos obtenidos del periodo de 34 años (1987-2021), con los del periodo de 26 años (1987-2013) (Rodríguez, 2014), donde el máximo valor es en mayo con  $543.4 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$  y diciembre con menor radiación con  $397.9 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$  y con un respectivo promedio anual de  $464.9 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ , se puede observar que la tendencia de esta variable climática no ha tendido una variación significativa.

➤ **Insolación:** La Figura 7 representa la tendencia de la insolación promedio mensual con valores de 34 años (1987-2021), donde se observa una mayor duración de insolación en los meses de febrero y marzo, siendo febrero el mes con más horas de insolación con un valor de 9.17 horas, esto debido a la poca presencia de nubes, característico del inicio de la estación de primavera, además los días son más largos, por lo que hay mayor exposición a la luz solar. En los siguientes meses durante el verano, disminuyen gradualmente las horas de insolación consecuente de la alta concentración de nubosidad durante este periodo, siendo el mes de septiembre con menor insolación al recibir 6.32 horas promedio mensual.

Se observa como la cantidad de energía recibida en primavera-verano disminuye paulatinamente, considerando que esta época del año los días son más largos, pero difiere debido al grado de nubosidad durante esta época, sin embargo, en los meses correspondientes a la estación invernal, la cantidad de horas de insolación acrecientan, considerando la presencia días despejados con menor duración. El promedio de insolación anual fue de 8.07 horas.

En comparación con los resultados obtenidos del periodo de 34 años (1987-2021), con el periodo de 26 años (1987-2013) (Rodríguez, 2014), donde los meses con más horas fueron febrero, marzo y mayo con 8.9 horas, meses correspondientes a la estación de primavera, por lo que se puede determinar que las condiciones atmosféricas tuvieron una leve variación en cuanto a la cantidad de nubosidad durante este periodo en comparación. El mes de menor insolación fue septiembre con 6.3 horas promedio mensual y un promedio anual de insolación con 8.00 horas, en este aspecto se puede deducir que sigue la tendencia que se observó en el periodo de 34 años teniéndose una diferencia mínima en los valores a través de los años.

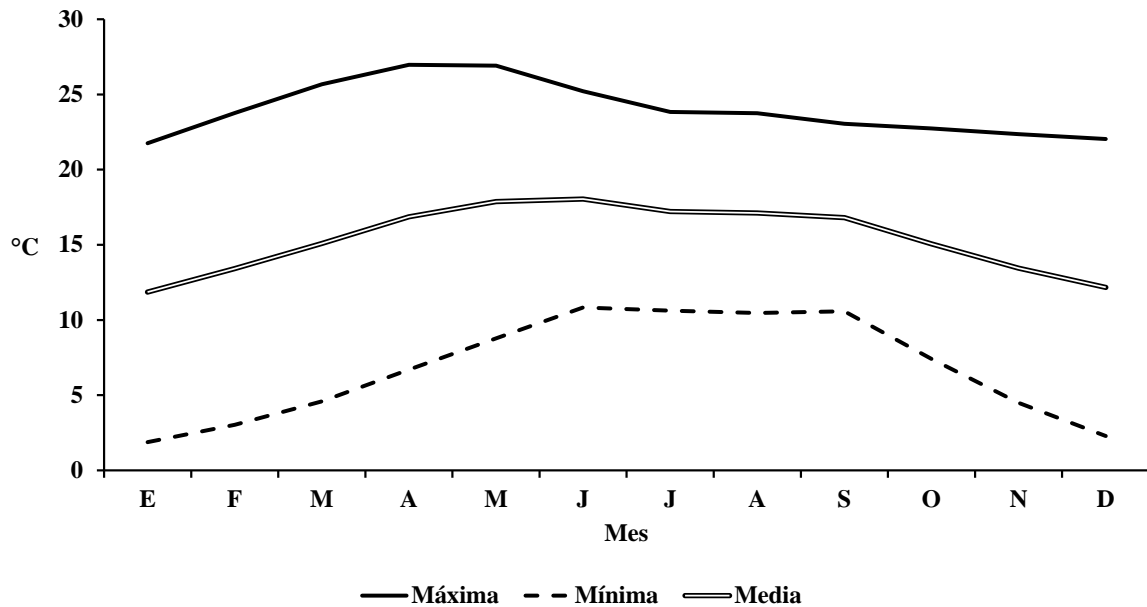


**Figura 7. Horas de insolación. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Temperatura:** La tendencia de la temperatura promedio mensual en la Estación Almaraz durante estos 34 años, se presenta en la Figura 8; se observa un ascenso de temperatura durante las estaciones primavera-verano, en este periodo se encuentra el mes más caliente del año en la zona de estudio, siendo junio con una temperatura media de 18.0 °C, a partir del siguiente mes observa un descenso poco considerable, resultado del incremento de días nublados característico del periodo de lluvias. Rodríguez (2014), reportó que junio es el mes más caliente con una temperatura media de 17.9 °C (1987-2013), esto indica que no existe variación significativa en los periodos reportados, pero si un incremento de 0.1 °C.

Al concluir el periodo de lluvias en el mes de septiembre inicia el enfriamiento de la atmósfera a partir del 23 de septiembre al 21 de marzo, correspondiente al inicio del otoño y final del invierno. En estos dos periodos es signo de bajas temperaturas, presencia de heladas, días más cortos y despejados; se presenta el mes de enero como el más frío con una temperatura promedio mensual de 11.9 °C y una temperatura mínima promedio mensual de 1.9 °C. En relación con lo reportado por Rodríguez (2014) con 26 años de registro no existe variación significativa, ya que, enero fue el mes más frío con 11.7 °C de temperatura promedio mensual y una mínima promedio de 1.8 °C.

Los valores de temperatura obtenidos en el periodo de estudio de 1987-2021 son: una temperatura mínima promedio de 6.8 °C, la media de 15.4 °C y máxima promedio de 24.0 °C, en relación a las temperaturas reportadas durante 1987-2013 (Rodríguez, 2014), fueron una temperatura mínima promedio de 6.5 °C, media de 15.2 °C y la máxima de 23.9 °C, lo que indica que la tendencia observada en estos 34 años presenta una variación mínima a lo largo de los años pero con un incremento reflejo del cambio climático global que sufre el planeta.



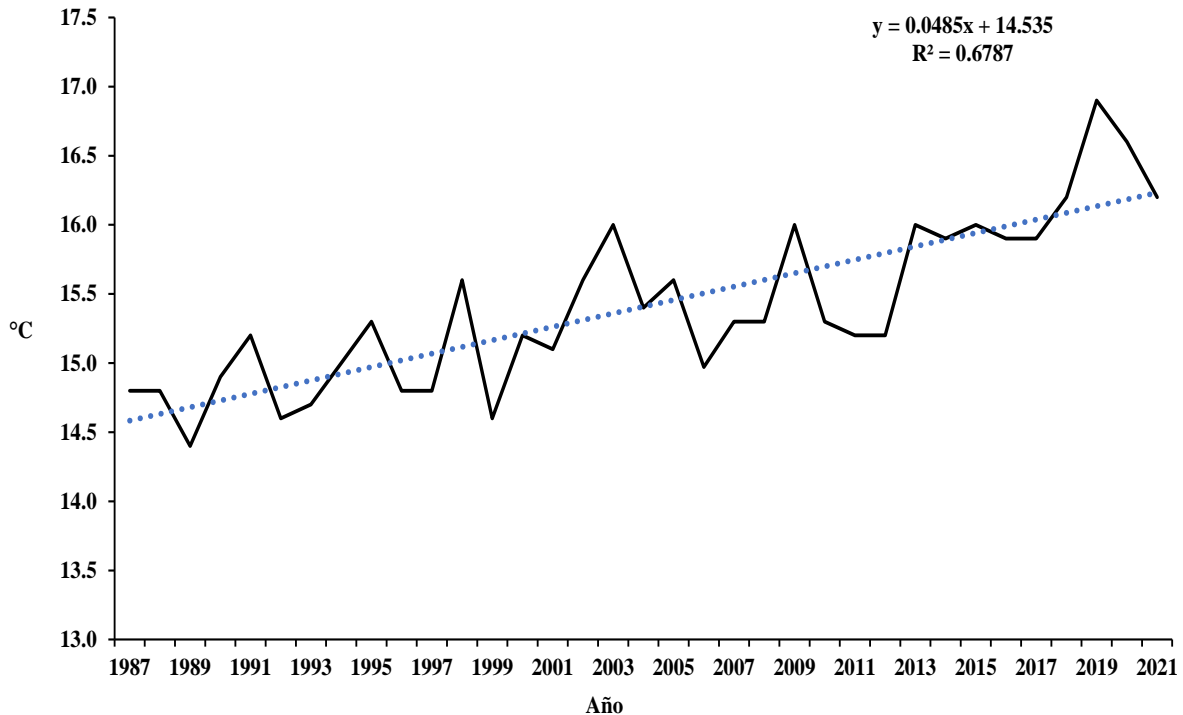
**Figura 8. Marcha de la temperatura promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Los valores extremos de temperatura registrados en la Estación Meteorológica Almaraz durante sus 34 años de trabajo son:

- a) Temperatura máxima extrema: 34.0 °C el día 08 de mayo de 1998.
- b) Temperatura mínima extrema: -7.9 °C el día 24 de enero de 1999.

En la Figura 9, se observa la tendencia de la temperatura promedio anual en los 34 años de registro de la estación meteorológica, con una variación anual y una tendencia positiva, siendo el año de 1999 con la temperatura promedio anual más baja con 14.6 °C y el año de 2019 se registró la temperatura promedio anual más alta con 16.9 °C, y estas variaciones que se han presentado a

través de este tiempo obedecen a patrones climáticos que son el resultado de las modificaciones de las áreas vecinas al área de estudio, incrementado por el cambio y uso del suelo para uso habitacional e industrial.



**Figura 9. Tendencia de la temperatura promedio anual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

En la Figura 10, se examina la tendencia de la temperatura a la intemperie promedio mensual registrada durante el periodo de 34 años (1987-2021); teóricamente la temperatura desciende con la altura aproximadamente a razón de 6.5 °C por cada kilómetro (Tejeda *et al.*, 2018), los valores obtenidos lo comprueban, de manera que la temperatura registrada cercana al suelo son menores valores llegando a observar diferencias con la temperatura mínima al abrigo de hasta 7 °C, asimismo, permite observar la ocurrencia de heladas desde el punto de vista agrometeorológico y correlacionar estos valores sobre el efecto para los cultivos, sobre todo los de porte bajo.

La inversión térmica está determinada por el ritmo de las estaciones y la estructura de la atmósfera, ya que entre esta y la cubierta terrestre se produce un intercambio de calor, humedad, movimientos constantes de aire, evaporación y transpiración.

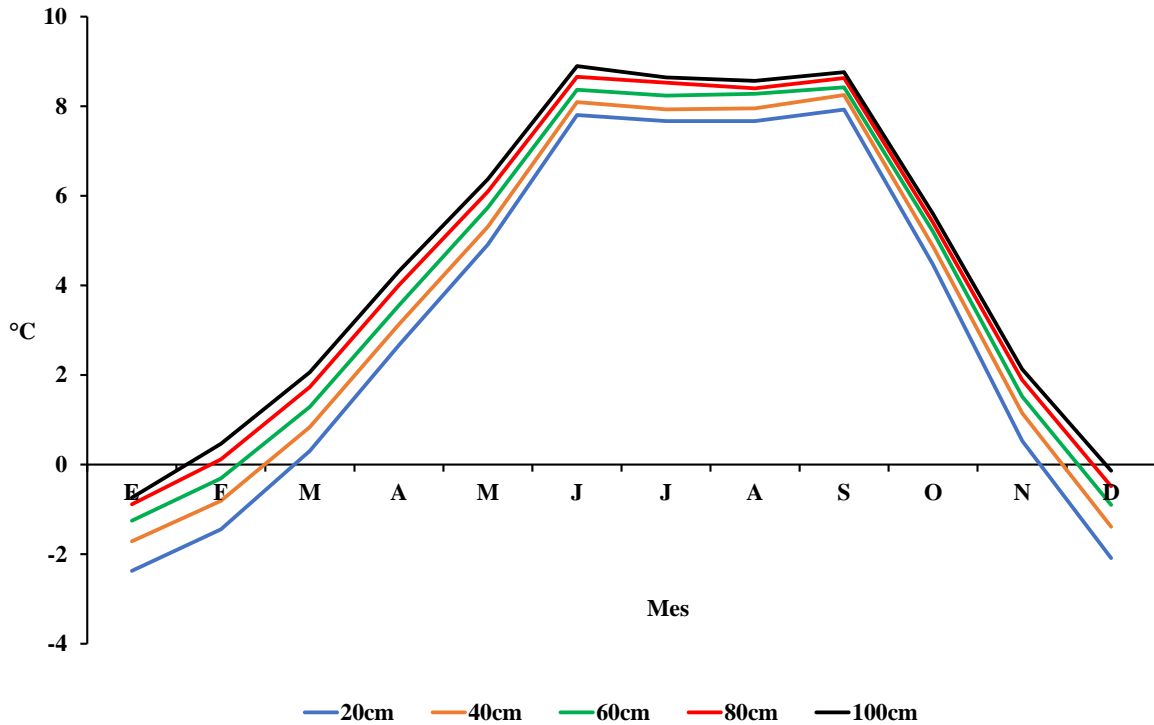
Los valores de temperatura promedio a la intemperie, registrados en el periodo de 1987 a 2021, son los siguientes:

- 20 cm del suelo: 3.2 °C
- 40 cm del suelo: 3.6 °C
- 60 cm del suelo: 4.0 °C
- 80 cm del suelo: 4.3 °C
- 100 cm del suelo: 4.6 °C

Los valores extremos de temperatura mínima a la intemperie de 1987 a 2021, se registraron el día 24 de enero de 1999:

- 20 cm del suelo: -14.5 °C
- 40 cm del suelo: -11.6 °C
- 60 cm del suelo: -10.6 °C
- 80 cm del suelo: -10.1 °C
- 100 cm del suelo: -9.9 °C

En general, la tendencia de la temperatura en la intemperie permite identificar las inversiones de temperatura en la mayoría de los días de los años registrados, enfatizando la presencia de la época invernal y puntualizando la incidencia de heladas, producto de la condición geográfica del valle en el cual se encuentra la estación meteorológica Almaraz.

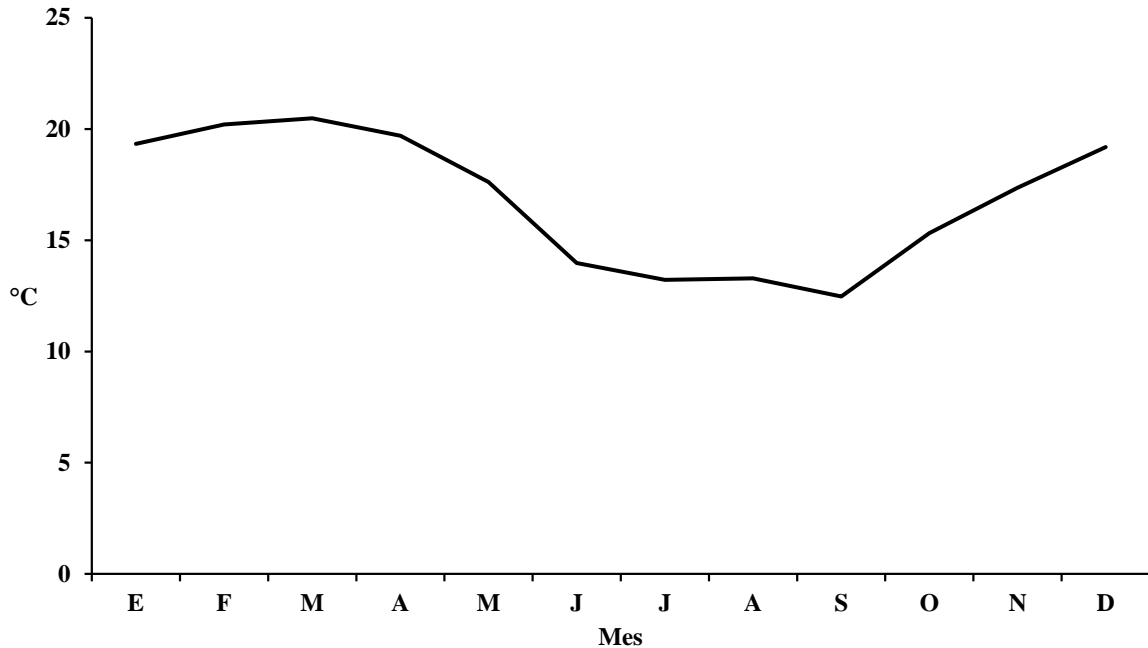


**Figura 10. Temperatura a la intemperie promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

En la Figura 11, se aprecia la tendencia de la oscilación térmica promedio mensual de la estación meteorológica Almaraz, este valor es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de temperatura promedio mensual observada de 1987-2021, a mayor sea este resultado mayor será la diferencia de temperatura entre el día y la noche, lo que hace referencia a un intervalo térmico, revelando la variación de temperatura de la zona de estudio.

La tendencia de oscilación térmica es significativa en los meses correspondientes a invierno e inicio de primavera desde diciembre hasta el mes de abril, con una oscilación térmica por arriba de los 19 °C correspondientemente y con un promedio anual de 16.8°C.





**Figura 11. Oscilación térmica promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

La temperatura del suelo es de considerable importancia ya que influye en el comienzo del desarrollo de las plantas, de la actividad y procesos de los organismos biológicos. Esta energía presenta una variación diaria, ya que, está sujeta a la cantidad de energía calorífica que recibe, absorbe y refleja, bajo la influencia de la radiación diurna (positiva) y nocturna (negativa). La conservación de temperatura del suelo dependerá de ciertas variables, como: color, humedad, calor específico, drenaje, aireación, entre otros (TecNM, s/f; UNLP, 2017).

En la Figura 12, se observa la tendencia de la temperatura del suelo arcilloso, promedio mensual de la estación meteorológica Almaraz durante el periodo 1988-2021, a 10, 20, 30 y 50 cm de profundidad.

A 10 cm de profundidad del suelo-arcilloso, se concentra la mayor temperatura en los meses de mayo a septiembre, siendo junio el mes con el mayor valor con 19.2 °C. Esto es una respuesta al comportamiento de la energía calorífica del sol, que es emitida en forma de radiación de onda corta sobre la atmósfera, donde sufre una disminución por la difusión, reflexión en las nubes, absorción por las moléculas de gases y por partículas en suspensión. Entonces, la cantidad de radiación solar que recibe la cubierta terrestre por unidad de superficie depende del ángulo de incidencia, en verano

dicha energía está concentrada en una superficie más pequeña lo que genera mayor temperatura y es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de onda larga, transmitiendo calor a la atmósfera. Posterior a estos meses correspondientes al periodo otoño-invierno la temperatura desciende, siendo el mes de enero con la temperatura mínima en el suelo con 11.0 °C, esto se debe a la duración de los días, a la poca humedad que regula la temperatura, ya que el agua es un conductor de calor, en ausencia de ésta, los suelos tienden a enfriarse más rápido que un suelo húmedo, en esta época del año,

- A 20 cm de profundidad, se registraron temperaturas altas en los meses de mayo a septiembre, siendo el mes de junio con el registro de temperatura más alta con 19.9 °C, este mes tiene los días más largos del año con una duración de 13:20 horas (López, 2021), permitiendo el aumento progresivo de la temperatura en el suelo, en el periodo otoño-invierno estas temperaturas descienden hasta 13.1 °C correspondientes al mes de enero.

- A 30 cm de profundidad del suelo-arcilloso: las altas temperaturas registradas se concentran en los meses de abril a septiembre, por lo que el mes de junio es el de mayor acumulación de temperatura en el horizonte terrestre con 21.4 °C y el mes de enero con la temperatura promedio más baja con 14.5 °C, ya que el registro de la temperatura para esta profundidad es sólo del año de 2018 a 2021, razón principal que la diferencia de promedios sea significativa en relación con las demás profundidades, que tienen una base de datos mayor a 25 años.

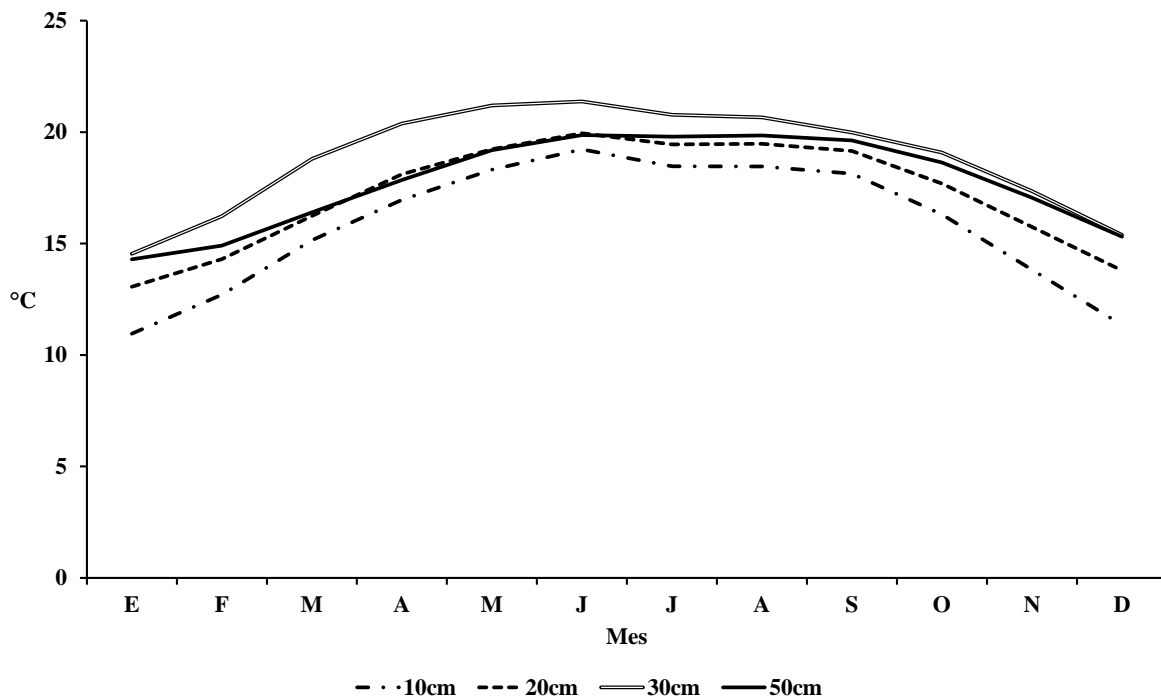
- A 50 cm de profundidad, la época de mayor concentración de temperatura es en los meses de marzo a septiembre, siendo el mes de junio con la temperatura promedio más alta con 19.9 °C y enero con el registro de temperatura promedio mínima con 14.3 °C.

La ley de Angot menciona que *“la amplitud de las oscilaciones de la temperatura del suelo disminuye geométricamente cuando la profundidad aumentada aritméticamente”* (UNLP, 2017).

De acuerdo con la tendencia de la temperatura promedio mensual de la estación meteorológica Almaraz la variación de temperatura no va reduciendo conforme incrementa la profundidad, esto se debe a que la evaporación del suelo cerca a la intemperie reduce la temperatura, así mismo la vegetación o residuos vegetales proporcionan sombra que reduce el calentamiento del suelo durante el día, actuando como aislante, los cambios estacionales y diurnos contribuyen en el perfil térmico.

El suelo arcilloso de la estación meteorológica está conformado por partículas pequeñas y un espacio generalmente poroso, lo cual absorbe y retiene más agua, el suelo permanece saturado

mucho después de la primavera y luego de la época de lluvias, que permite el incremento de la temperatura conforme incrementa la profundidad.



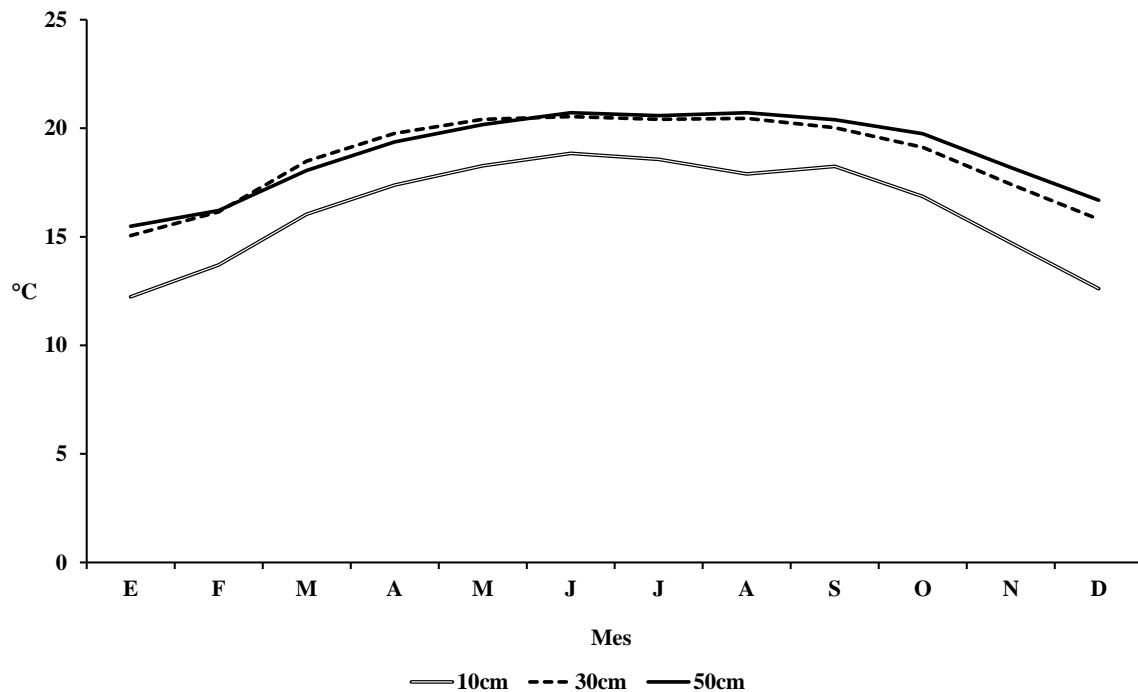
**Figura 12. Temperatura del suelo arcilloso, promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

En la figura 13 se observa la tendencia de la temperatura promedio mensual del suelo tepetate registrado en la estación meteorológica Almaraz desde el 2018 a 2021, a 10, 20, 30 y 50 cm de profundidad, obteniendo los siguientes valores:

- A 10 cm de profundidad del suelo-tepetate, el incremento de temperatura comienza desde el inicio de la primavera hasta finalizar el verano, siendo junio el mes con el registro más alto con 18.8 °C, conforme va iniciando la época de otoño-invierno la temperatura desciende, presentándose una temperatura mínima en el mes de enero con 12.2 °C.
- A 20 cm de profundidad del suelo-tepetate no existe registro de temperatura a esta profundidad ya que no se cuenta con el termómetro indicado para las mediciones.
- A 30 cm de profundidad del suelo-tepetate se concentra una mayor temperatura en los meses de abril a septiembre, siendo el mes de junio el mayor registro con 20.5 °C y enero con 15.1 °C.

- A 50 cm de profundidad del suelo-tepetate se concentra una mayor amplitud de temperatura en los meses de mayo a septiembre, 20.7 °C es la temperatura mayor registrada correspondiente al mes de junio y 15.5 °C la temperatura promedio mínima registrada en el mes de enero.

La tendencia de temperatura promedio mensual en suelo-tepetate tiene una leve variación entre la profundidad de 30 cm y 50 cm de 0.2 °C. El tepetate es un material terroso inerte, por lo que no presenta alteraciones en su volumen por cambios de humedad, se podría decir que mantiene su temperatura más estable.



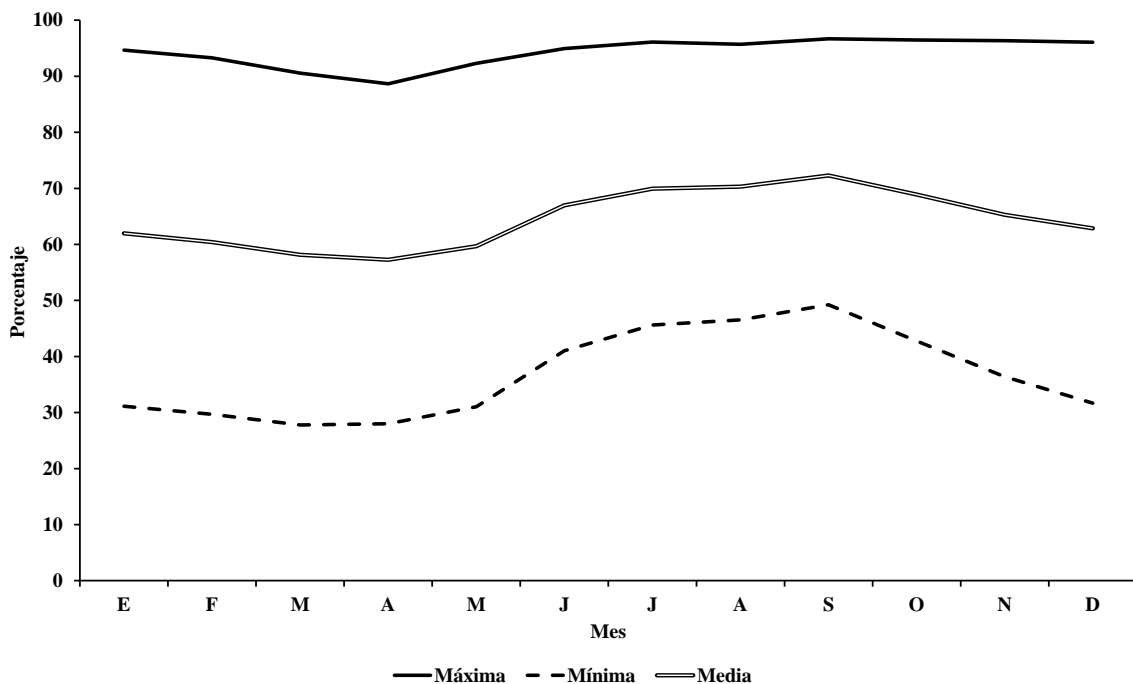
**Figura 13. Temperatura del suelo tepetate, promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Humedad ambiental:** En la Figura 14, se presenta la tendencia de la humedad ambiental promedio mensual en la estación meteorológica Almaraz durante el periodo de 1987-2021, en la cual, la humedad atmosférica sigue una conducta inversa a la evaporación, cuando la humedad ambiental es alta producto de la presencia de la precipitación y nubosidad, se incrementa la saturación del aire, la atmósfera no puede admitir más vapor de agua lo que ocasiona además un cambio en la temperatura y no se produce evaporación. Sin embargo, cuando la humedad es baja,

consecuente de las altas temperaturas, el agua se evapora rápidamente, promoviendo el proceso de enfriamiento por evaporación

El mes más húmedo es septiembre con 72.3% y el mes con menor humedad es abril con 57.3% de humedad promedio. Los valores máximos se presentan en septiembre, con 96.7% de humedad promedio y marzo con 27.8% de humedad promedio mínima. Comparando los valores reportados por Rodríguez (2014) en un periodo de 26 años, septiembre fue el mes con mayor porcentaje de humedad atmosférica con 72.9% y abril con el promedio mensual de humedad más bajo con 56.8%, se percibe una leve variación en el porcentaje de humedad reportados para los meses con mayor y mínima humedad atmosférica, por el aumento de la evaporación y temperatura en los últimos años. Se tiene considerado la presencia de días con 100% de humedad al amanecer; principalmente en la época de lluvias.

En resumen, en los 34 años de registro de información, el valor promedio de humedad mínima anual es de 36.7%; la humedad media con un valor de 64.5% y la humedad máxima promedio anual de 94.3%

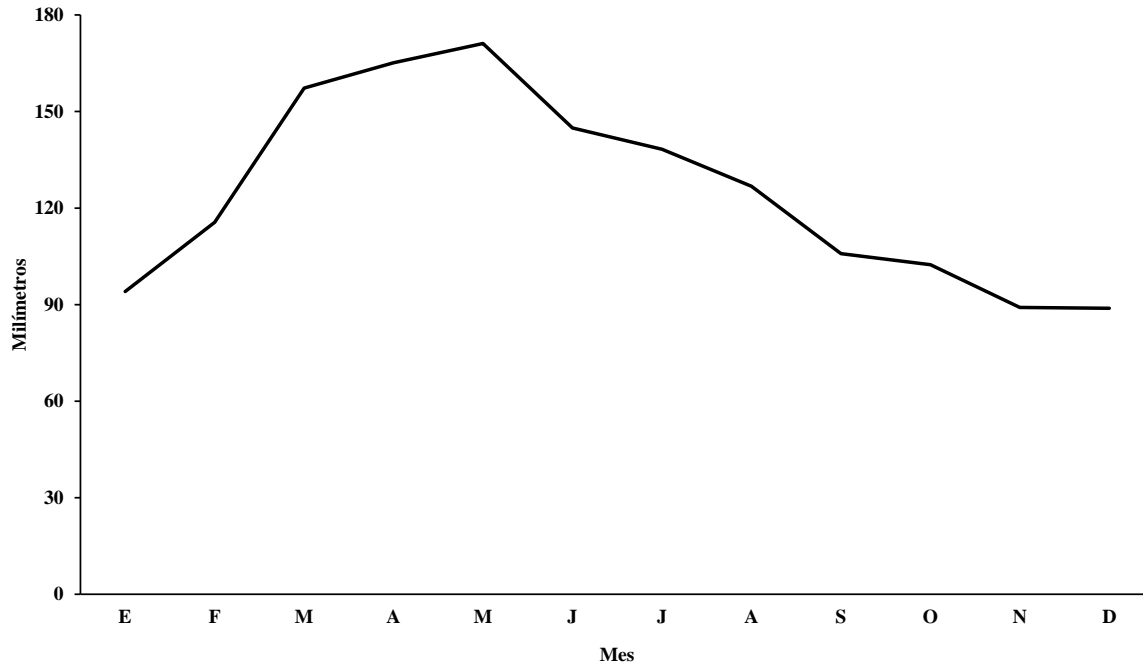


**Figura 14. Tendencia de la humedad ambiental promedio mensual (°C). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Evaporación:** En la Figura 15, se observa la tendencia de la evaporación promedio mensual del periodo de 1987-2021, señalando el inicio del periodo cálido del año donde se percibe como la evaporación llega a un punto máximo, hasta alcanzar un punto de saturación en la atmósfera al adquirir el aumento de la humedad atmosférica presente y se refleja en forma de precipitación. En el período frío existe una disminución de la temperatura, de la radiación y una menor acumulación de calor, por lo que los niveles de evaporación descienden.

La evaporación media registrada durante 34 años en la estación meteorológica es de 1,499.33 mm anuales, el punto máximo de evaporación es de 171.14 mm en el mes de mayo, mientras tanto diciembre es el punto mínimo de evaporación de promedio mensual con 88.84 mm.

Los valores notificados por Rodríguez (2014) de 1987-2013 señalan que mayo fue el mes de mayor evaporación con 170.67 mm, en tanto a noviembre con 89.86 mm de promedio mensual fue el punto mínimo de evaporación, con una evaporación promedio anual con 1,484.97 mm, se deduce que existe una variación entre ambos periodos de manera no simultánea, ya que la evaporación promedio anual, en el actual periodo aumento con una diferencia de 14.36 mm, Entre los valores del punto máximo corresponde al mismo mes, con una diferencia de 0.47 mm a favor del estudio actual. Sin embargo, en el punto mínimo promedio mensual de la evaporación, en el periodo actual de 34 años es menor en relación con el periodo reportado por Rodríguez de 26 años de registro y el mes no es el mismo. Por lo que se denota el impacto de las fluctuaciones climáticas, por el cambio climático con un comportamiento irreversible a las condiciones promedio en la atmósfera.



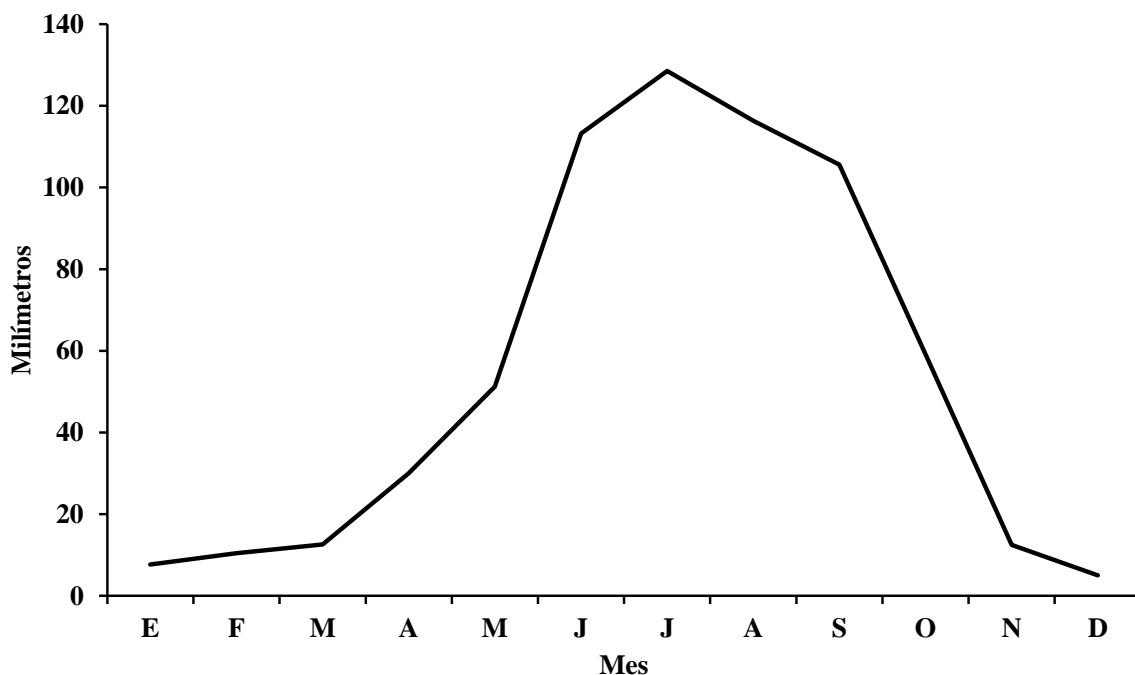
**Figura 15. Tendencia de la evaporación promedio mensual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Precipitación:** La temporada de lluvias en la zona de estudio se presenta en la mitad caliente del año, esto es de abril a octubre, por lo que se incrementa la humedad atmosférica, la presión disminuye, lo que da lugar al ascenso de vapor de agua y debido a su enfriamiento al ascender se condensa y forman las nubes, asimismo, esas gotas de agua son capaces de vencer su estabilidad y gravedad para precipitarse a la superficie terrestre. En la Figura 16, se presenta la tendencia de la precipitación (pp) promedio mensual en el transcurso de los 34 años de registro de la estación meteorológica Almaraz.

El periodo de lluvias abarca los meses de junio a septiembre, la precipitación máxima se registra en el mes de julio con 128.5 mm, en invierno por lo general las lluvias son ausentes, por lo que la acumulación de la precipitación es menor, principalmente en el mes de diciembre con 5.0 mm de pp y una probabilidad del 4.7% de lluvia invernal, la cual se obtiene de la suma del promedio mensual de precipitación de los meses de enero, febrero y marzo, entre el promedio anual de precipitación, multiplicado por 100. El promedio anual de precipitación es de 652.1 mm.

Existe una leve variación de acuerdo con lo reportado por Rodríguez (2014) con una base de datos de 26 años; quien señaló a julio como el mes más húmedo con 124.3 mm de pp, diciembre con el registro mínimo de precipitación promedio mensual con 4.1 mm., y una precipitación promedio anual de 612.1 mm.

De acuerdo con este análisis, no se observa la presencia de sequía intraestival (Figura 16), sin embargo, se ha presentado en algunos años de este estudio, como sucedió en 1994, 1995, 2000, 2009, 2013, 2014 y 2018, lo cual abre la posibilidad de realizar una propuesta de un estudio puntual sobre el efecto de esta sequía en los cultivos de la zona de estudio.



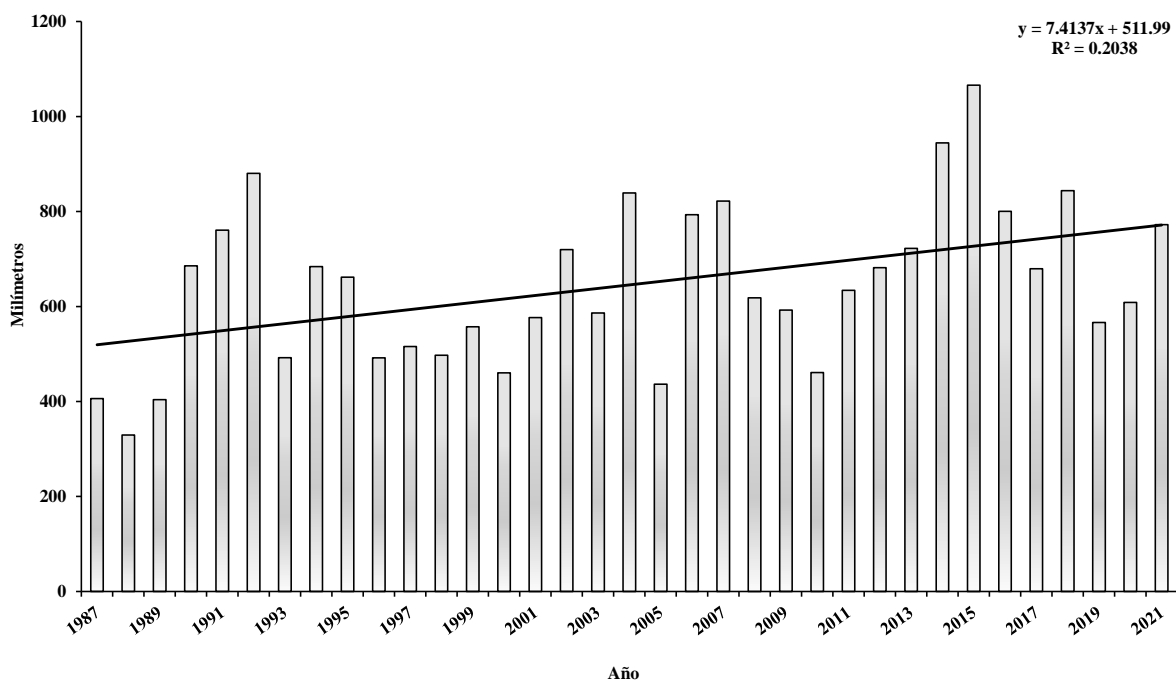
**Figura 16. Tendencia de la precipitación promedio mensual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

La precipitación total anual acumulada cada año en el periodo de este estudio, se presenta en la Figura 17, donde se aprecia que esta ha variado de un año a otro. El año más lluvioso fue en 2015 con 1,066.1 mm anuales, mientras que 1988 fue el año más seco con 329.5 mm. Asimismo la máxima pp registrada en 24 horas ha sido 90.1 mm el día 10 de octubre de 1992.

La tendencia de la pp a través de estos años es de un incremento en el volumen total, sin embargo, es necesario analizar también su ocurrencia durante el año, porque es su distribución la que afecta



al crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícolas, como ha sido evidenciado en varios estudios que la estación meteorológica ha apoyado a través de su trabajo diario.



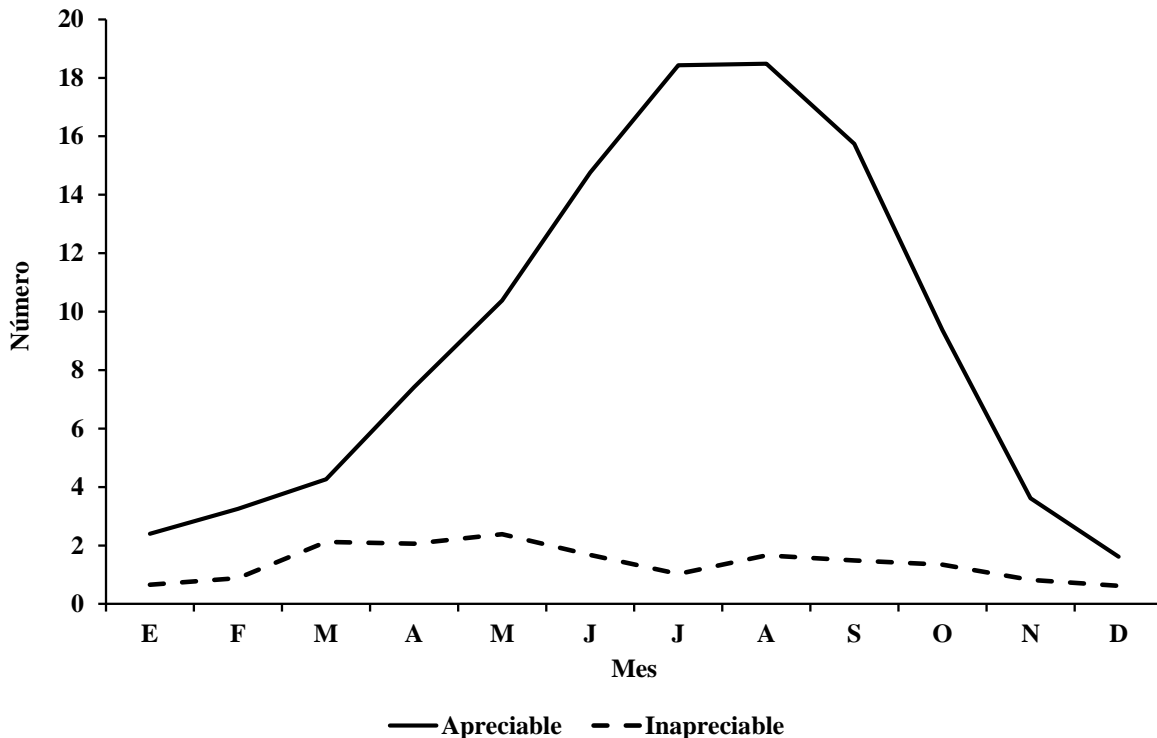
**Figura 17. Tendencia de la precipitación promedio anual (mm). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Ahora bien, es importante señalar el tipo de lluvia que se presenta durante el año, esto es, días con lluvia apreciable que es cuando la precipitación es mayor o igual a 0.1 mm. En este punto, el mayor promedio mensual de días con lluvias apreciable del período de 34 años de la estación meteorológica Almaraz, se presenta durante julio y agosto con 18 días (Figura 18), meses en que ocurre la temporada de lluvias y la presencia de mayor nubosidad. Los menores valores se presentan en el período invernal; el mes con el menor número de días con lluvia apreciable es diciembre, con 2 días en promedio.

Asimismo, los días con lluvia inapreciable que es cuando la pp es menor a 0.1 mm. El mayor número de días ocurre en los meses de marzo a junio y agosto con 2 días promedio mensual.

El promedio anual de días con lluvia apreciable es de 110 días al año, mientras que el número de días con lluvia inapreciable es de 17 días.

Comparando los datos con los del 1987-2013 reportados por Rodríguez (2014), en donde julio y agosto fueron los meses con mayor número de días con lluvia apreciable con 19 y 18 días, respectivamente, y diciembre con 2 días de lluvia apreciable con el menor valor, y asimismo, el promedio anual fue 107 días al año con lluvia apreciable, asimismo con un número de días con lluvia inapreciable promedio anual de 15 días, se puede observar que estos números solo variaron en un par de días de cada variable, lo que muestra una tendencia similar en ambos períodos.



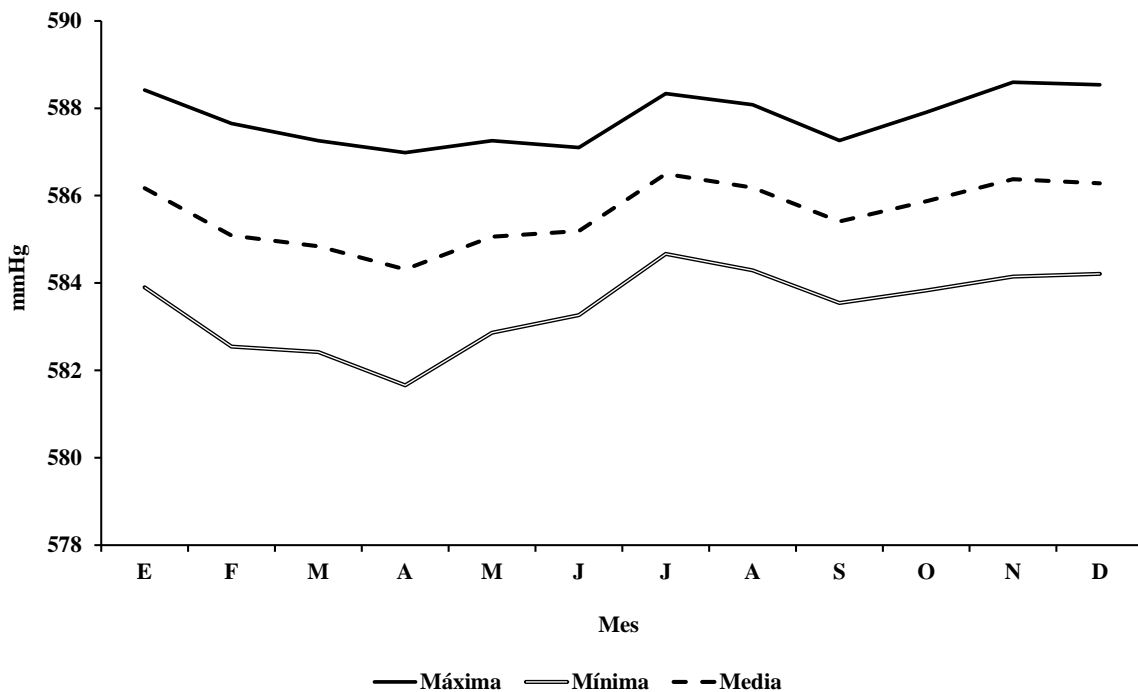
**Figura 18. Días con precipitación promedio mensual (días). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Presión atmosférica:** La tendencia de la presión atmosférica promedio mensual durante el periodo de estudio (Figura 19), muestra una variación durante el año que se debe a la relación que guarda esta variable con la temperatura, la nubosidad, la humedad atmosférica y la posición de la tierra con respecto al sol durante el año. La variación presente en la zona de estudio resalta el incremento de la presión en la época de verano, consecuente de la disminución de temperatura, incremento de la humedad atmosférica y disminución de la insolación, condiciones particulares de la zona de estudio durante el verano, sin embargo, el valor promedio mensual de la presión

disminuye como producto de la baja humedad atmosférica, aumento de la insolación, característico del periodo invernal e inicios de la primavera.

El promedio anual de la presión atmosférica mínima es de 583.4 mmHg, el valor medio de 585.6 mmHg y el máximo promedio de 587.8 mmHg. La máxima promedio es en noviembre con 588.6 mmHg y mínima promedio es en abril con 587.0 mmHg.

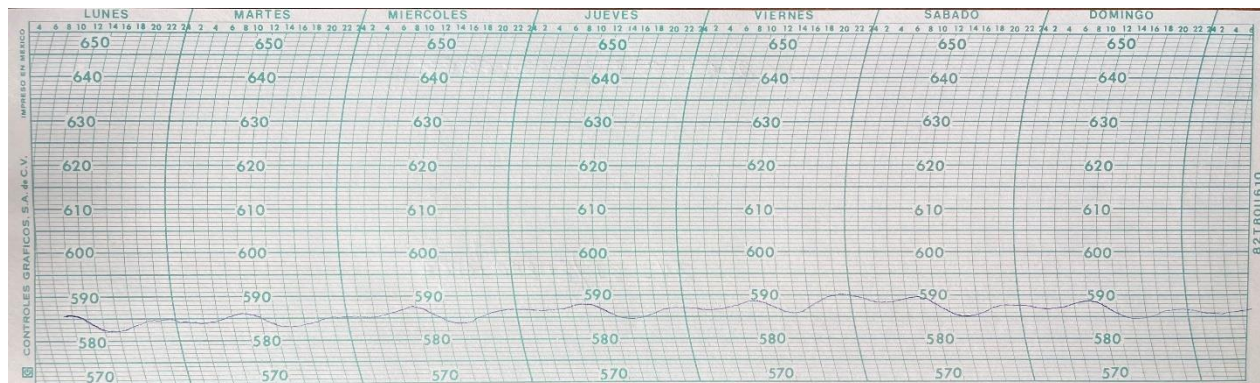
Los valores reportados por Rodríguez (2014) del periodo de 1987-2013, señaló que la máxima promedio se registró en julio con 587.9 mmHg y la mínima promedio correspondió al mes de abril con 581.3 mmHg. El promedio anual de la presión atmosférica mínima fue de 582.6 mmHg, la media promedio anual fue de 585.0 mmHg y el máximo promedio anual fue de 587.3 mmHg.



**Figura 19. Tendencia de la presión atmosférica promedio mensual (mmHg). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Durante el día, la presión atmosférica expresa una variación que es conocida como “Marea Barométrica” la cual hace referencia a las oscilaciones de presión que están sujetas a un valor térmico en un periodo diurno o semidiurno (Lindzen y Chapman, 1970). En la Figura 20 se aprecia esta variación de la presión atmosférica, que a modo de ejemplo se incluye esta gráfica del

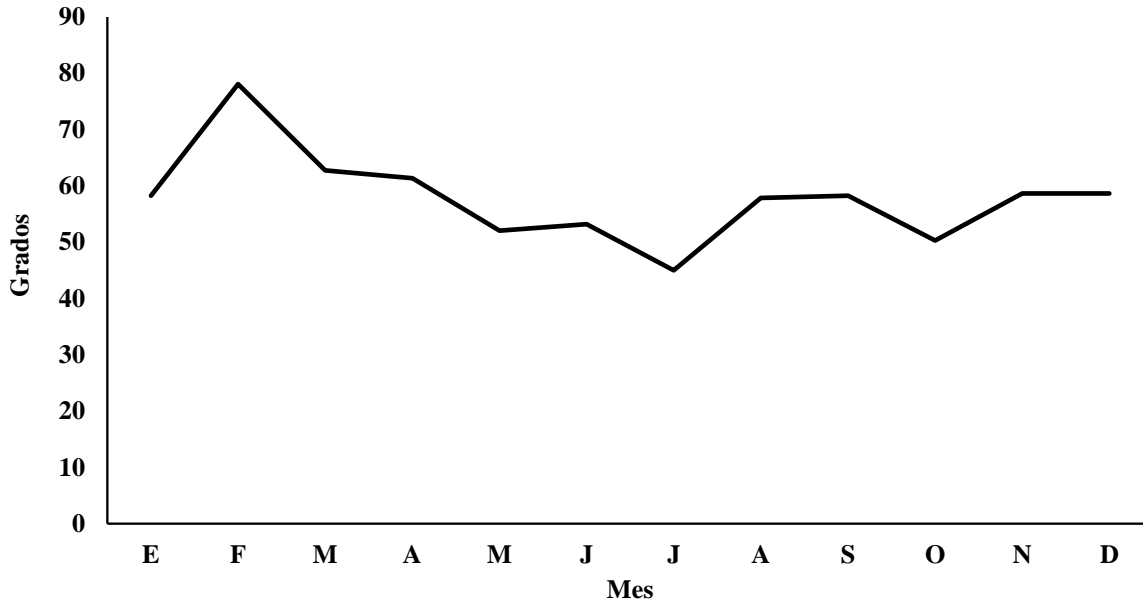
barómetro obtenida de la estación meteorológica Almaraz, de una semana tomada al azar de un año. Se señalan que los dos puntos máximos de presión se presentan entre las 8:00 a 10:00 horas y el entre las 20:00 a 22:00 horas. Los dos puntos mínimos se presentan entre las 2:00 a 4:00 horas, mientras que el segundo mínimo ocurre entre las 14:00 a 16:00 horas. En general, los valores más bajos de presión y a su vez los más altos se observan durante el periodo diurno del día, en condiciones meteorológicas normales, sin embargo, pueden presentarse desfases en las horas y valores de presión en un día, debido a la presencia de algún cambio brusco en el tiempo atmosférico en la zona de estudio.



**Figura 20. Variación diaria de la presión atmosférica (mmHg) del 24 al 31 de enero de 2022. Estación Meteorológica Almaraz (2022).**

➤ **Viento:** El viento se define como el movimiento horizontal del aire, de este elemento climático se evaluó la dirección promedio mensual a 2 metros de altura, y su velocidad promedio mensual y su recorrido promedio mensual a diferentes alturas a saber: 30 cm, 2.0 m, 4.0 m y 6.0 m.

La dirección está definida como el lugar de donde proviene del viento, referenciada a los puntos cardinales y se expresa en grados. Con base a las observaciones diarias realizadas en el periodo de 1987-2021, en la Figura 21 se observa que la dirección dominante del viento es de dirección NE con un valor promedio de 57.9 grados.

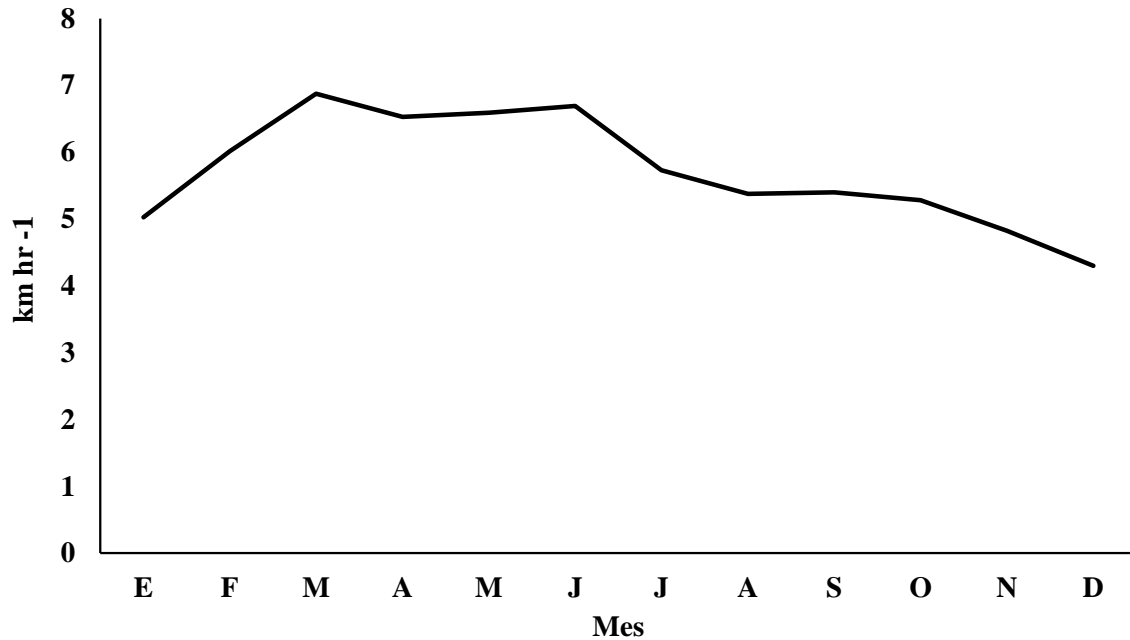


**Figura 21. Dirección del viento promedio mensual (grados). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Durante el día y durante el año se presentan otras lecturas donde el viento tiene dirección Sur, SE, o SW, principalmente en los meses de febrero a marzo. En la época invernal es frecuente observar que el viento tiene dirección Norte debido a la presencia de masas de aire fría que llegan del norte.

Por lo que respecta a la velocidad del viento, en meteorología se expresa frecuentemente en metros por segundo o kilómetros por hora, en función de su intensidad, asimismo, se maneja el termino de calma cuando existe ausencia del él. En la Figura 22, se presenta el comportamiento de su promedio mensual durante el periodo de 1987-2021 de la estación meteorológica Almaraz.

Durante los meses de febrero a junio, se registran las mayores velocidades del viento en parte por la llegada de frentes fríos al país. La velocidad máxima promedio mensual registrada corresponde al mes de marzo con una velocidad de  $6.9 \text{ km hr}^{-1}$  y  $165.03 \text{ km día}^{-1}$ , mientras que la mínima registrada se ubica en el mes de diciembre con  $4.3 \text{ km hr}^{-1}$  y  $110.19 \text{ km día}^{-1}$ . La velocidad promedio anual de la zona de estudio es de  $5.6 \text{ km hr}^{-1}$  y  $183.4 \text{ km día}^{-1}$ .



**Figura 22. Velocidad del viento promedio mensual (km hr<sup>-1</sup>). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

La trayectoria del viento disminuye conforme la altura de observación es menor, debido a la presencia de múltiples obstáculos en su desplazamiento, mientras que a mayor altura el viento se desplaza libremente al no encontrar obstáculos que lo limiten, es por ello que se evalúa a 0.3 m, 2.0 m, 4.0 m y 6.0 m de altura dentro del periodo de 34 años (1987-2021) de la estación meteorológica Almaraz (Figura 23).

Los valores promedio diarios del recorrido del viento son los siguientes:

- a) 0.3 m del suelo: 52, 168.0 m día<sup>-1</sup>
- b) 2.0 m del suelo: 123, 081.4 m día<sup>-1</sup>
- c) 4.0 m del suelo: 147, 639.7 m día<sup>-1</sup>
- d) 6.0 m del suelo: 171, 713.3 m día<sup>-1</sup>

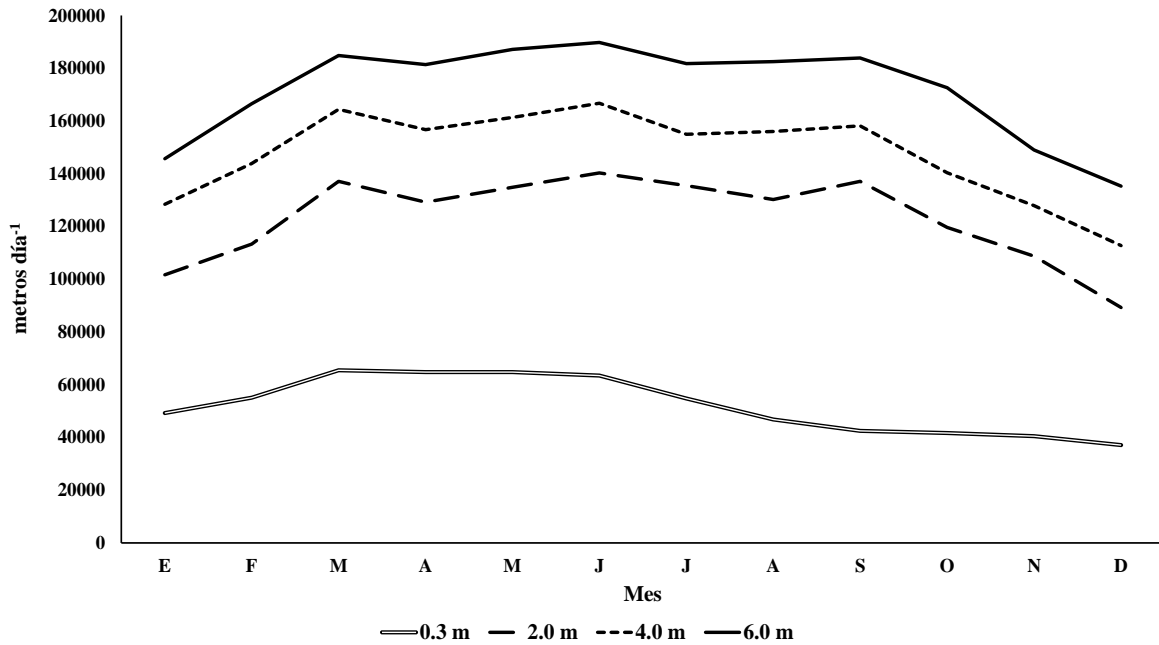
Al comparar los resultados con los obtenidos por Rodríguez (2014), se observa que tanto la velocidad, como la dirección del viento presentan la misma tendencia, donde la velocidad reportada en metros fue:

a) 0.3 m del suelo: 55,112.10 m día<sup>-1</sup>

b) 2.0 m del suelo: 123,081.4 m día<sup>-1</sup>

c) 4.0 m del suelo: 147,639.7 m día<sup>-1</sup>

d) 6.0 m del suelo: 171,713.3 m día<sup>-1</sup>



**Figura 23. Recorrido del viento promedio mensual (metros día<sup>-1</sup>). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

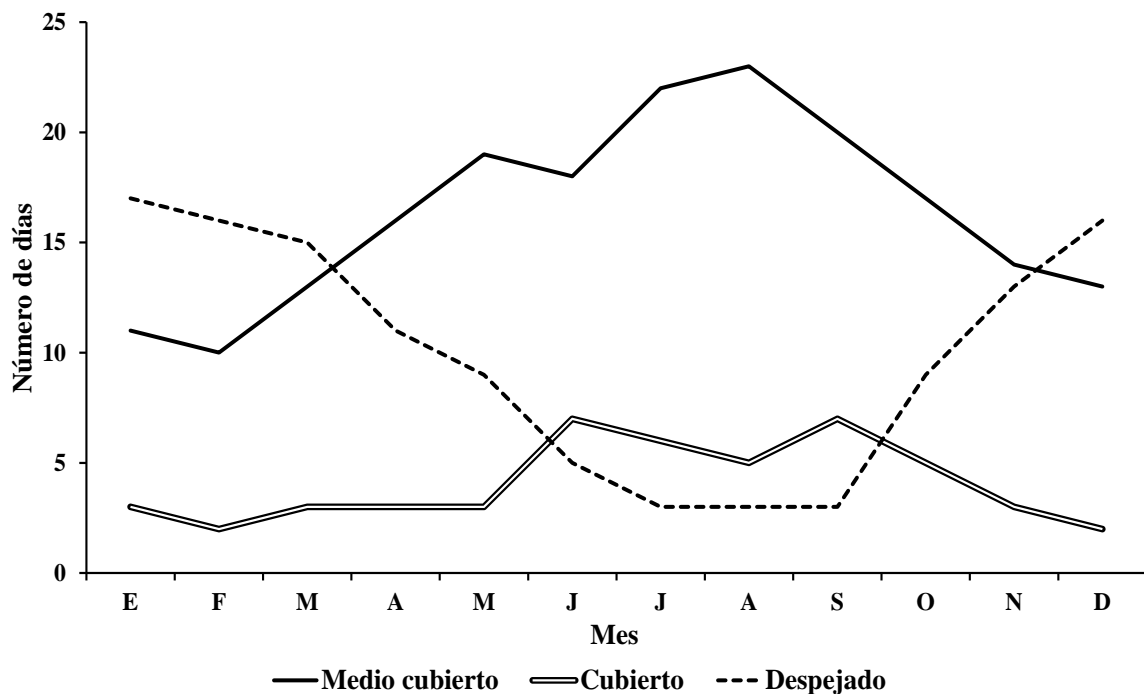
El comportamiento normal del viento en la zona de estudio es menor en todas las alturas estudiadas durante el invierno, en vista del aumento de presión atmosférica durante esta época, lo que se produce una mayor estabilidad atmosférica. Sin embargo, la presencia de algún fenómeno meteorológico extraordinario puede causar cambios en el estado del tiempo en la región.

➤ **Nubosidad:** La Figura 24 corresponde al periodo de 34 años (1987-2021), donde se describe el comportamiento promedio mensual de los días con cielos despejados, nublados y medio nublados; considerando como cielo despejado de 0-3 octas, medio nublado 4-6 octas y nublado de 7-8 octas.

Se observa la mayor presencia de cielo nublado y medio nublado durante la temporada de lluvias, los días despejados tiene una relación inversa en cuanto a las dos variables mencionadas anteriormente y corresponde al periodo invernal donde hay menos nubes cubriendo el cielo.

El total de días despejados al año es de 120, los días cubiertos son 49 al año y los días medio cubiertos son 196 al año.

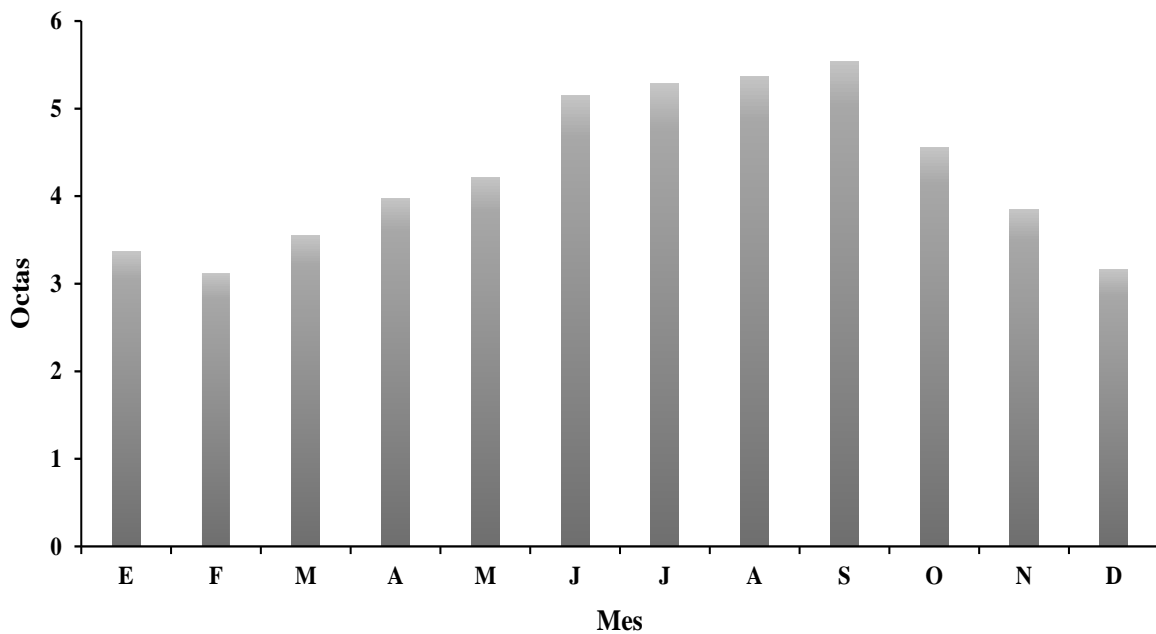
Los datos reportados por Rodríguez (2014), y los obtenidos en este trabajo son similares, sin embargo, el contar con más información se incrementa la confiabilidad de la tendencia de esta y todas las variables de este estudio, a lo largo del tiempo.



**Figura 24. Número promedio mensual de días cubiertos, medio cubiertos y despejados. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**



Ahora bien, la tendencia de la nubosidad promedio mensual se observa en la Figura 25, con un precedente ascendente durante los meses de junio a septiembre, con un promedio mensual de 5 octas, destacando el mes de septiembre con 6 octas, periodo que coincide a la temporada de lluvias, los valores mínimos se encuentran en los meses de la época invernal: diciembre, enero y febrero, con un promedio mensual de 3 octas. Cabe señalar que existen días con 0 octas de nubosidad, así mismo durante la mayor parte del año hay presencia de días medio nublados. Rodríguez (2014), reportó los meses de junio a septiembre con un promedio de 5 octas (cielo medio cubierto), la menor nubosidad se presentó en los meses de diciembre a marzo con un promedio de 3 octas, la variación no es significativa, por lo que sigue la misma tendencia de este elemento climático.

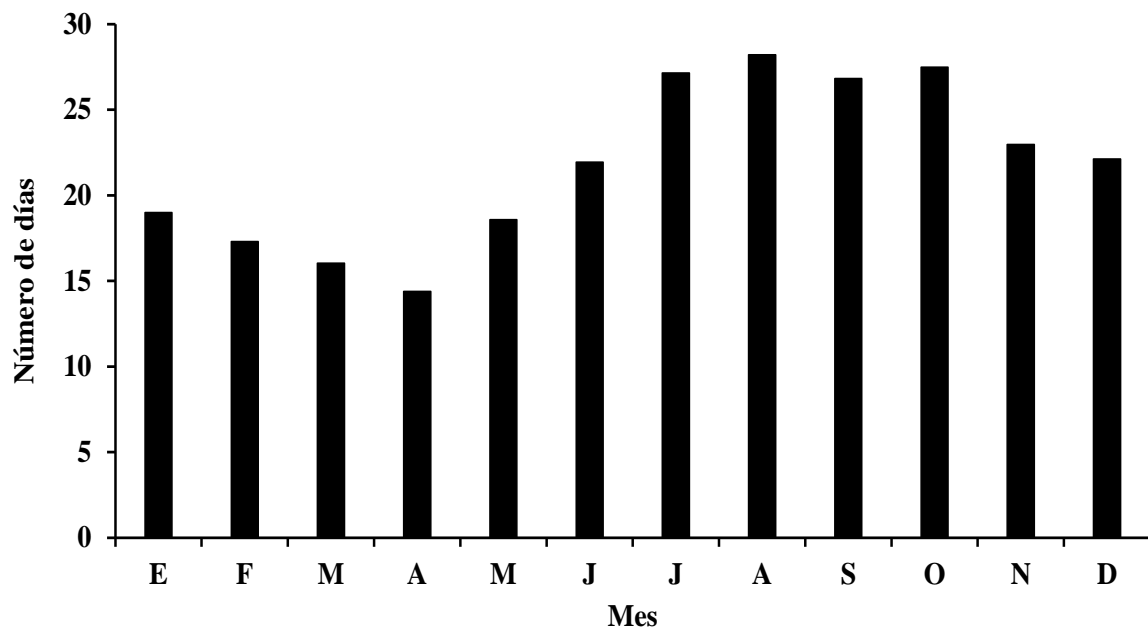


**Figura 25. Nubosidad promedio mensual (octas). Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

## ➤ Fenómenos diversos

**a) Días con rocío:** En la zona de estudio durante la temporada de lluvias se presenta la mayor condensación de vapor de agua en la atmosfera este sufre un enfriamiento durante el periodo nocturno o de madrugada lo que da resultado a la formación del rocío. En la Figura 26, se observa la tendencia de los días con rocío promedio mensual durante el periodo de 1987-2021, los meses de mayor presencia de rocío son de julio a octubre con 27 días en promedio mensual, pero el mes de agosto difiere con un día más siendo el mes con el punto más alto de 28 días en promedio, al inicio del año empieza a descender los días con rocío por aumento de la evaporación y disminuye la precipitación; el mes con menos días en la presencia de rocío es abril con 14 días al mes en promedio. El total de días con rocío es de 262 días al año.

Comparando el periodo de Rodríguez (2014), los datos obtenidos fueron: agosto con 28 días con rocío, como el punto máximo y abril con 14 días con rocío, fue el mes con menos presencia. El total de días con rocío para ese periodo fue 251 días al año. Muestran la misma tendencia a través de los años con la presencia de rocío, pero con una ligera variación al promedio anual.

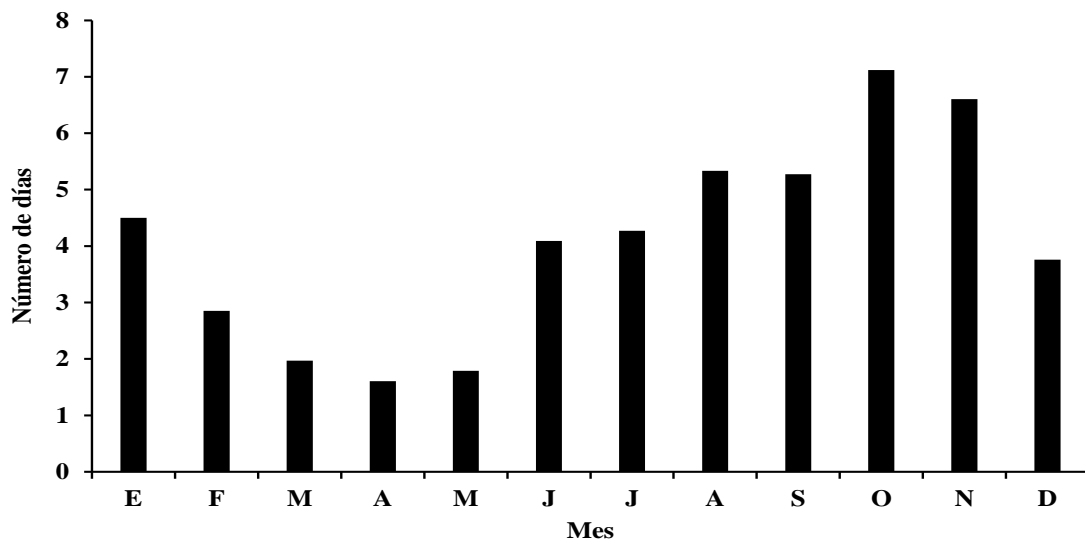


**Figura 26. Días con rocío promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**b) Días con niebla:** Gracias a la región geográfica y las condiciones ambientales de la zona de estudio, permite la formación de niebla, principalmente en las épocas verano y otoño, lo cual se debe al incremento de la humedad atmosférica, nubosidad y que las condiciones de la temperatura superficial del suelo cambian en la madrugada disminuyendo la temperatura y el vapor de agua presente cercano a la superficie se condensa, lo que favorece con mayor facilidad que se alcance el punto de rocío y con ello la formación de la niebla, la cual disminuye la visión horizontal de manera muy importante, a medida que avanza la mañana, los rayos del sol calientan la superficie del suelo y la niebla se disipa.

Para el periodo de 34 años de registro en la estación, octubre es el mes con más días con presencia de niebla en el área de estudio con 7 días al mes en promedio; la niebla se produce debido al enfriamiento en la atmósfera, por el fin de la época de lluvias y la presencia de humedad residual en el ambiente. En invierno disminuye la ocurrencia de niebla, disminución de la nubosidad, la humedad atmosférica y presencia de bajas temperaturas durante la noche. El total de días con niebla es de 49.2 al año (Figura 27).

De acuerdo con Rodríguez (2014), el punto más alto con la presencia de niebla fue en octubre con un promedio mensual de 8 días y un total de 50 días al año, como promedio en el periodo de 26 años. La tendencia de la ocurrencia de nieblas disminuyó con 1 día de diferencia en los últimos años.



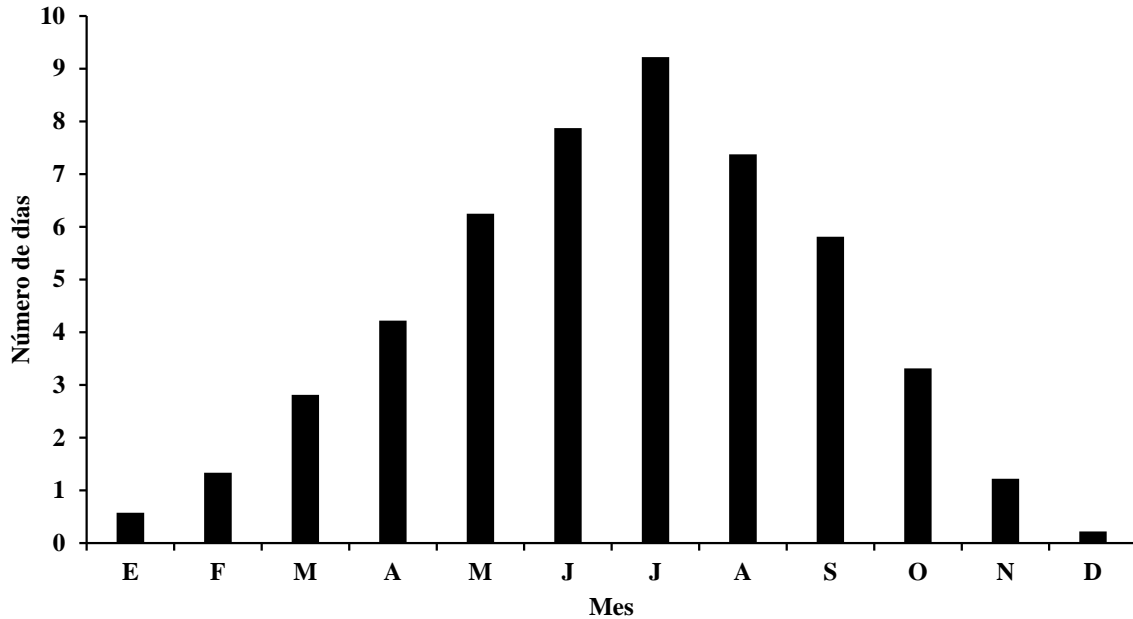
**Figura 27. Días con niebla promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**c) Días con tormenta eléctrica:** Las tormentas eléctricas se originan a partir de un proceso, que consta del movimiento del aire cálido y húmedo sobre las capas de la atmósfera, durante la primavera y verano este aire se mueve en fuertes corrientes de aire ascendentes, estas se enfrían conforme ascienden en vapor de agua y se condensa, la alimentación de las corrientes de masa de aire es debido a la inestabilidad en la atmósfera, por lo que continua el crecimiento vertical de las nubes, en este estado hay formación de cristales de hielo alcanzando una temperatura de 0 °C, una vez que llega a su máximo desarrollo reciben el nombre de Cumulonimbos, provocando fuertes precipitaciones y descargas eléctricas. Una tormenta eléctrica es capaz de producir uno o todos los siguientes fenómenos: ráfagas de viento, relámpagos, lluvias intensas, truenos y caída de granizo.

En la Figura 28, se observa la tendencia promedio mensual de la ocurrencia de este fenómeno meteorológico durante el periodo de 34 años (1987-2021), se puede observar a julio con el mayor número de tormentas eléctricas con un promedio de 9 días.

Diciembre es el mes con el menor número de tormentas eléctricas con un promedio mensual de 0.2 días, debido a la disminución de la temperatura, ausencia de lluvia y baja humedad ambiental. El total de días con tormentas eléctricas es de 50.2 días al año.

Durante el periodo de 1987-2013, el número de días con tormentas eléctricas es igual a 9 días en promedio durante el mes de julio, para el mes de diciembre no hubo presencia de este fenómeno y un total de 44.5 días al año en presencia de este fenómeno meteorológico, el presente estudio, integra una base de datos más amplia en comparación a lo reportado por Rodríguez (2014) lo que resulta que, en los últimos años, este electrometeoro ha incrementado su presencia en la misma época del año.



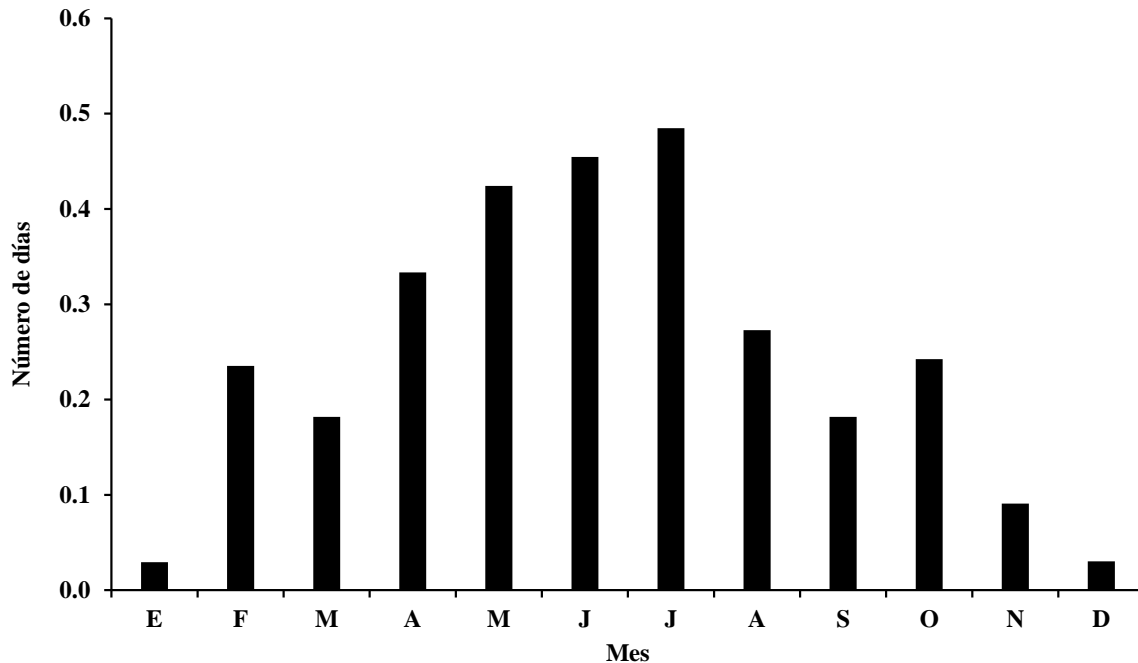
**Figura 28. Días con tormenta eléctrica promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**d) Días con granizo:** La precipitación del granizo es consecuencia de la humedad que generalmente se incorpora a la atmósfera en la época de mayor radiación solar y mayor evaporación, que favorece la formación de nubes de gran desarrollo vertical, del género Cumulonimbos, en las cuales se forman violentas corrientes de aire verticales que empujan el agua que se halla en la parte inferior de la nube hacia lo más alto, alcanzando temperaturas muy frías y formando cristales de hielo, condiciones favorables para dar origen al granizo.

En la Figura 29, se observa que al comenzar la época de primavera comienza el ascenso de días con granizo por presentar los factores favorables para la formación de nubes Cumulonimbos, el periodo de mayor precipitación de este fenómeno durante el año es en los meses de junio y julio con 0.5 días en promedio, y posteriormente en el periodo invernal sobre todo en diciembre y enero se registra el menor valor con 0.0 días con granizo. El promedio anual de la ocurrencia es de 3.0 días al año.

Asimismo, estos datos se asemejaron a los reportados para el periodo de 1987-2013, donde se tuvo un promedio anual de 2.6 días. Lo anterior demuestra la baja incidencia de granizo en la zona, y no existe una variación significativa en la época de mayor y menor ocurrencia, aunque, existe una

ligera variación de días al año con granizo presente. Por tanto, se puede deducir que la agricultura en la zona, no se verá afectada de forma recurrente por este hidrometeoro.



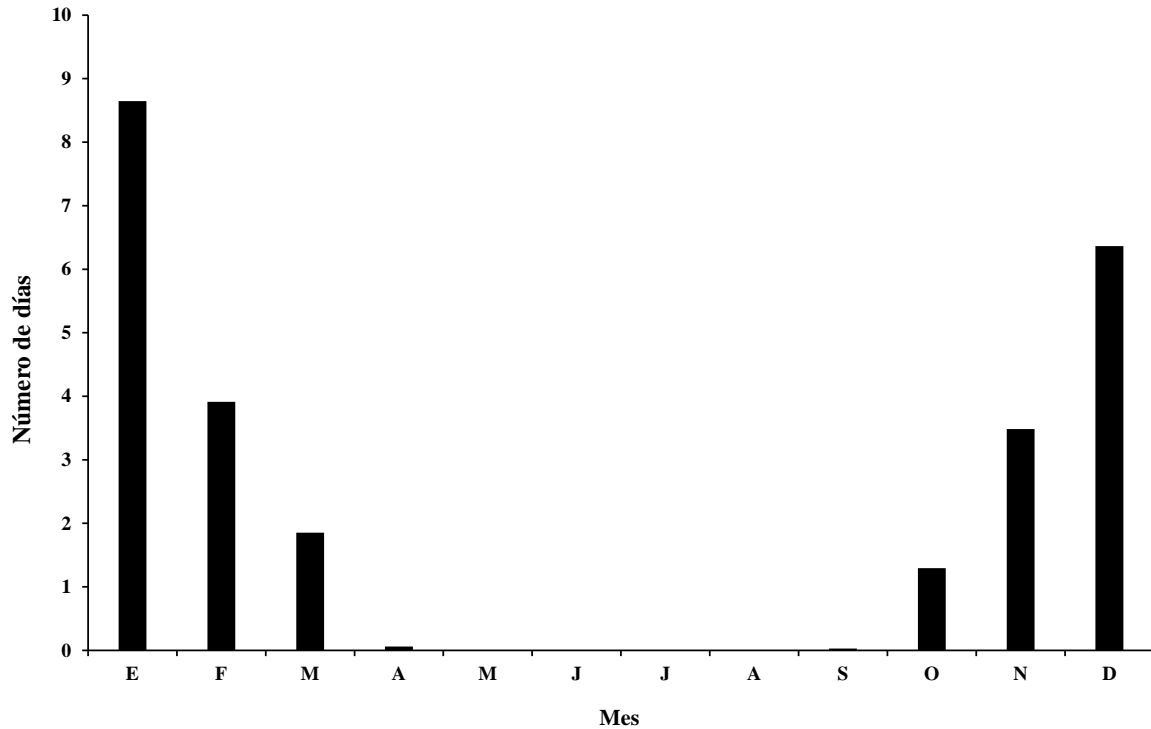
**Figura 29. Días con granizo promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**e) Días con helada:** La ocurrencia de heladas, desde el punto de vista meteorológico, se entiende como la disminución de la temperatura igual o menor a 0 °C, es decir, que ésta se provoca cuando la temperatura media del aire y la humedad ambiental disminuye conforme se acerca el periodo invernal, características de en la zona de estudio.

Aunque para fines agrícolas, las más perjudiciales son las heladas tempranas que ocurren en el mes de octubre y las tardías que se presentan a finales de la primavera. Las primeras heladas se presentan de septiembre a noviembre, mientras que la última helada se observa de marzo a abril.

Para el periodo de 1987-2021 se observa, en la Figura 30, las temperaturas comienzan a descender a principios de octubre y se prolongan durante el periodo invernal y finalizan hasta marzo del siguiente año. El mes con mayor incidencia de heladas es enero con un promedio de 9 días y los meses de abril hasta septiembre no hay presencia de ellas, lo que se considera como periodo libre de heladas. El total de días es de 26 heladas al año.

Comparando lo reportado por Rodríguez (2014), enero fue el mes con mayor ocurrencia de heladas con un promedio igual de 9 días, seguido de diciembre con 7 días y un periodo libre de heladas de 6 meses aproximadamente, lo que comprendió de abril a septiembre. El total de días con helada fue de 27 al año, por lo que el índice de temperaturas bajas sea similar para ambos periodos.



**Figura 30. Días con helada promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

## 4.2. Parámetros agroclimáticos

➤ **Unidades calor.** En la Tabla 3 se presentan los datos de unidades calor acumuladas por mes, obtenidas por el método residual, con base a la temperatura media mensual y a cuatro temperaturas base: 4.5, 6, 8 y 10 °C, para el periodo de 1987-2021.

➤

**Tabla 3. Unidades calor acumuladas por mes, en función de tres valores de temperatura base. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

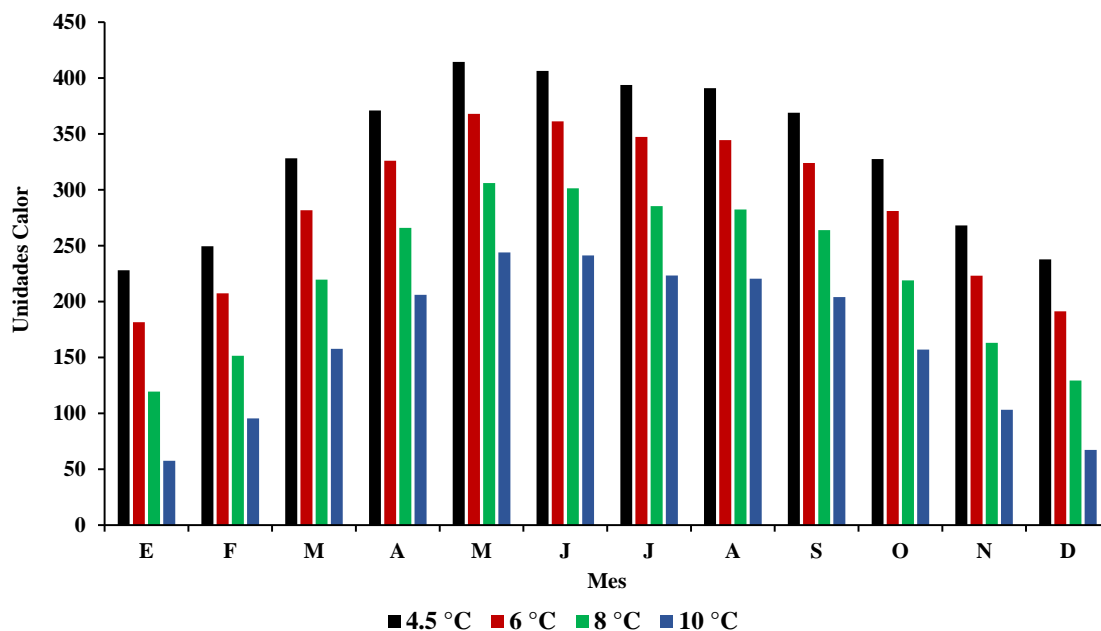
Mes	Temperatura Media (°C)	Unidades Calor acumuladas			
		4.5 °C	6 °C	8 °C	10 °C
E	11.9	228.1	181.6	119.6	57.6
F	13.4	249.5	207.5	151.5	95.5
M	15.1	328.2	281.7	219.7	157.7
A	16.9	371.0	326.0	266.0	206.0
M	17.9	414.5	368.0	306.0	244.0
J	18.0	406.3	361.3	301.3	241.3
J	17.2	393.9	347.4	285.4	223.4
A	17.1	391.0	344.5	282.5	220.5
S	16.8	369.0	324.0	264.0	204.0
O	15.1	327.6	281.1	219.1	157.1
N	13.4	268.2	223.2	163.2	103.2
D	12.2	237.9	191.4	129.4	67.4
<b>Total</b>		<b>3,985.2</b>	<b>3,437.7</b>	<b>2,707.7</b>	<b>1,977.7</b>

El total anual de acumulación de Unidades Térmicas, con una temperatura base de 4.5 °C es de 3, 985.2, con una temperatura base de 6 °C es de 3, 3437.7, para una temperatura base de 8 °C es de 2, 707.7 y para una temperatura base de 10 °C se obtuvo un total de 1, 977.7.

Se observa que, a una temperatura base de 8 °C existe una acumulación de calor suficiente para el crecimiento y desarrollo de los cultivos de la zona templada, sin embargo, es necesario definir el ciclo de producción, ya sea primavera-verano u otoño-invierno para establecer el potencial de unidades térmicas para los cultivos.



De forma general y particular, permite calendarizar las diversas actividades agrícolas que se desarrollan en campo; además, estimar el desarrollo fenológico de los cultivos tanto anuales como perennes. En la Figura 31, se observa que la mayor acumulación mensual es en la mitad caliente del año, y esta desciende en la época invernal.



**Figura 31. Unidades calor acumuladas promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Es importante resaltar que para realizar de manera eficiente una calendarización de las actividades agrícolas en campo, este parámetro agroclimático debe analizarse de forma integral junto con los demás parámetros que aquí se exponen.

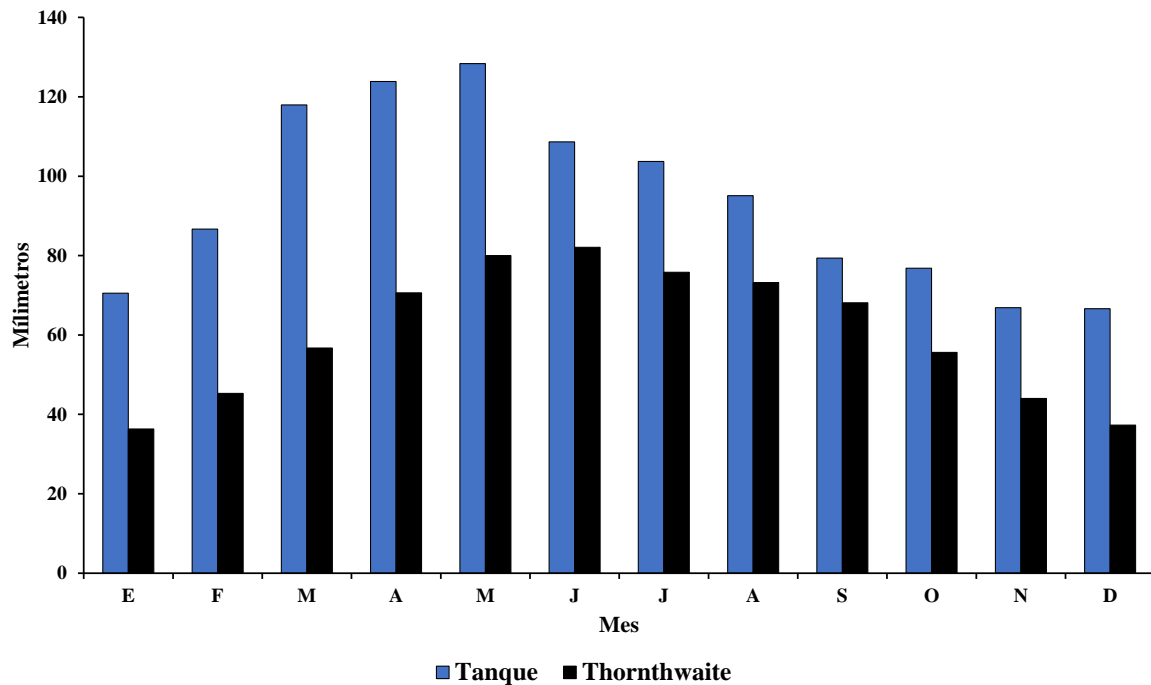
➤ **Evapotranspiración potencial.** Se determinó con base a los métodos de Thornthwaite y del Tanque de evaporación “Tipo A”, para este último se consideró el valor de 0.75 para el coeficiente C. En la Figura 32 se muestran los resultados.

Comparando el comportamiento de la tendencia de la ETP con la evaporación (Figura 15) y la precipitación (Figura 16), muestran un comportamiento semejante e inverso, respectivamente, durante el periodo lluvioso y seco del año.

El valor total anual de la ETP por el método del tanque de evaporación “Tipo A” es de 1,124.50 mm; el mes con mayor ETP es mayo con 128.35 mm promedio mensual, disminuye

progresivamente en los siguientes meses, y es en diciembre cuando se presenta el valor más bajo con 66.63 mm promedio mensual. Sin embargo, por el método de Thornthwaite la ETP, muestra un valor menor con respecto al método anterior, teniendo un total anual de ETP de 725.0 mm. En el mes de junio se reportó el valor más alto con 82.10 mm de promedio mensual y en enero con 36.30 mm con el valor más bajo.

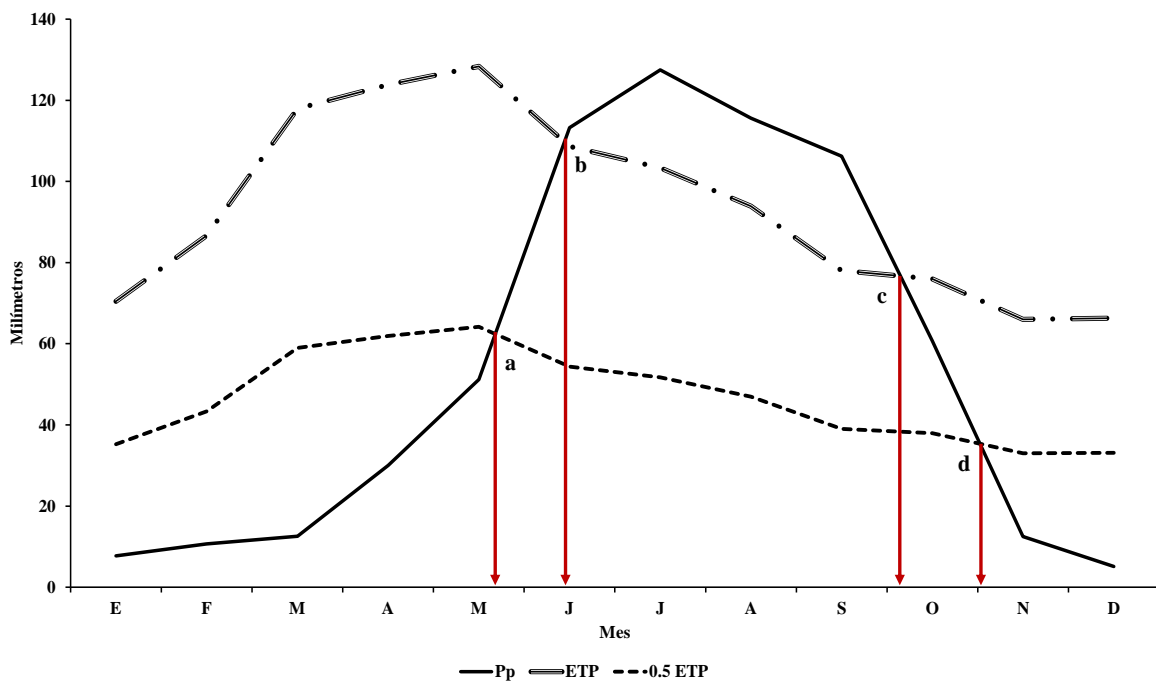
Por el método de Thornthwaite, se obtiene un valor de ETP determinado sólo por la influencia de la temperatura media mensual y la latitud del sitio de observación, por lo que la curva de su tendencia mensual es semejante a la de la temperatura media mensual. Por su parte, el método del tanque de evaporación “Tipo A”, permite visualizar el efecto de más elementos del clima en la tendencia de la ETP, como lo es la velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura, la insolación, la humedad atmosférica, la precipitación, entre otros, que en su conjunto caracterizan a las condiciones del tiempo atmosférico prevalecientes durante el año.



**Figura 32. Evapotranspiración potencial (mm) promedio mensual. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Estación de crecimiento.** La estación de crecimiento definida como el periodo en el cual la disponibilidad de agua y temperatura son favorables para el desarrollo de los cultivos, manifiesta la gran importancia que tienen estos elementos climáticos: temperatura y precipitación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos por los métodos de disponibilidad de humedad y disponibilidad de temperatura.

**a) Por disponibilidad de humedad:** En el caso de la zona de estudio, en la Figura 33 se presenta la estación de crecimiento obtenida del análisis de la información que durante 34 años se ha recopilado en la estación meteorológica Almaraz. La estación de crecimiento inicia en el mes de mayo y finaliza en el mes de octubre; presenta un periodo húmedo de cuatro meses, esto es, de junio y a inicios de octubre, periodo en el cual se abastecen las necesidades de los cultivos de temporal y se recarga el perfil del suelo. Por lo tanto, es una estación de tipo normal, por tener presente el periodo húmedo señalado.



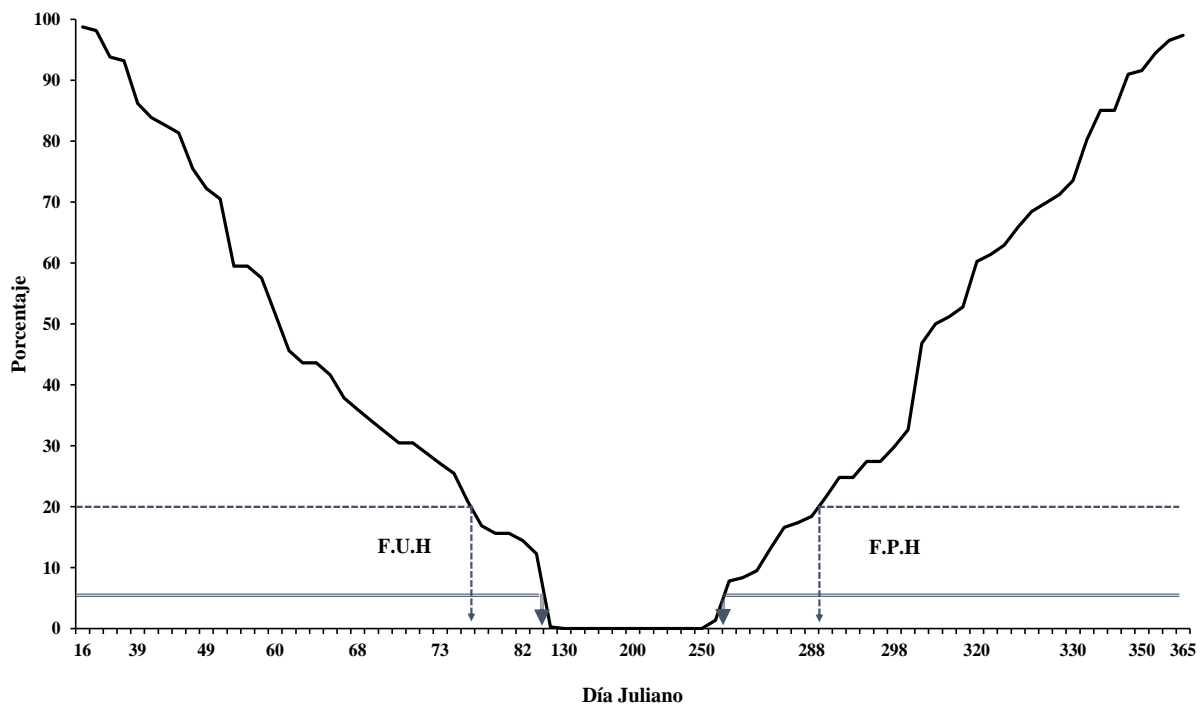
**Figura 33. Estación de crecimiento por disponibilidad de humedad. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.**

Donde: a= inicio de estación de crecimiento. b= inicio del periodo húmedo. c= fin del periodo húmedo. d= fin de estación de crecimiento.

**b) Por disponibilidad de temperatura:** Para determinar la estación de crecimiento por disponibilidad de temperatura, se consideró la duración del periodo de bajo riesgo de ocurrencia de helada (PLH) a partir de la probabilidad de la ocurrencia de la última y primera helada, a través del método de distribución normal.

En la Figura 34, se puede observar estas fechas de ocurrencia de helada al 5 y al 20% de probabilidad; para el caso del 20% de probabilidad de ocurrencia, el PLH se extiende 213 días, que comprende del día 77 al 290 juliano (Anexo 1), es decir, del 18 de marzo al 17 de octubre.

Estas condiciones permiten el desarrollo de la agricultura de temporal, ciclo P-V; si se cuenta con riego, las fechas de siembra de estos cultivos pueden iniciar desde el mes de abril o mayo con la aplicación de al menos dos riegos de auxilio antes de iniciar el temporal en el mes de junio (Figura 33).



**Figura 34. Estación de crecimiento por disponibilidad de temperatura. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Donde: FUH= fecha de última helada, y FPH= Fecha de primera helada.

Con una probabilidad del 5%, el PLH normalmente se especifica para cultivos perennes de zona templada; en este estudio se obtuvo que este PLH abarca del 17 de abril al 20 de septiembre, día 107 y 263 juliano, respectivamente, para la fecha de última y primera helada, con un total de 156 días, 57 días menos de los 213 días de duración del PLH al 20% de probabilidad.

➤ **Horas frío:** Para el periodo de estudio de 1987-2022, se determinó las horas frío (HF) a través de cálculos de acumulación de estas, para cada ciclo invernal, empleando los métodos de Da Mota y del Dr. Weinberger. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos.

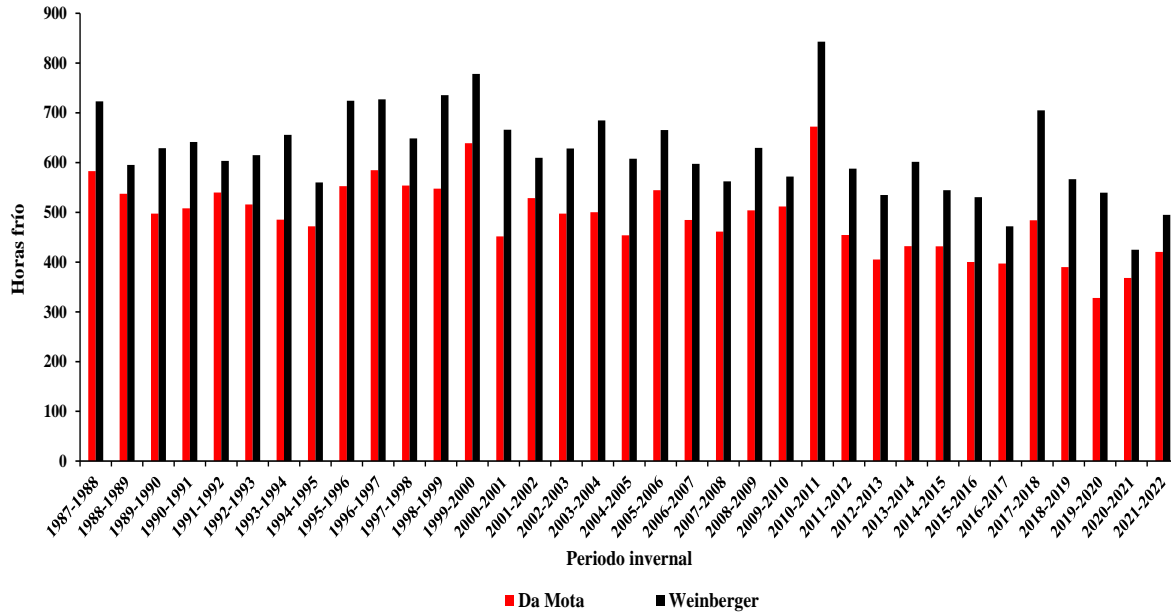
Por el método de Da Mota se determinó que se acumulan en promedio 489.6 HF, mientras que por el método del Dr. Weinberger se obtuvieron 620.1 HF; una diferencia de 130.5 HF. El promedio de los dos métodos es de 554.9 HF, que sirve de referencia para definir si los cultivares de los frutales caducifolios que se encuentran en la zona de influencia de la estación, están cubriendo sus necesidades de frío y así promover la brotación en la siguiente primavera del periodo invernal.

Esta baja acumulación de HF es limitante para otras especies de frutales caducifolios que puedan ser más exigentes en la acumulación de frío (Anexo 5), lo que obligaría a utilizar compensadores de frío y con ello satisfacer las necesidades de frío de esos frutales caducifolios, por lo tanto, para la zona se recomienda árboles frutales caducifolios que tengan un requerimiento promedio de 555 horas frío.

Cada periodo invernal también es diferente, como se observa en la Figura 35.

**Tabla 4. Horas frío acumuladas por periodo invernal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

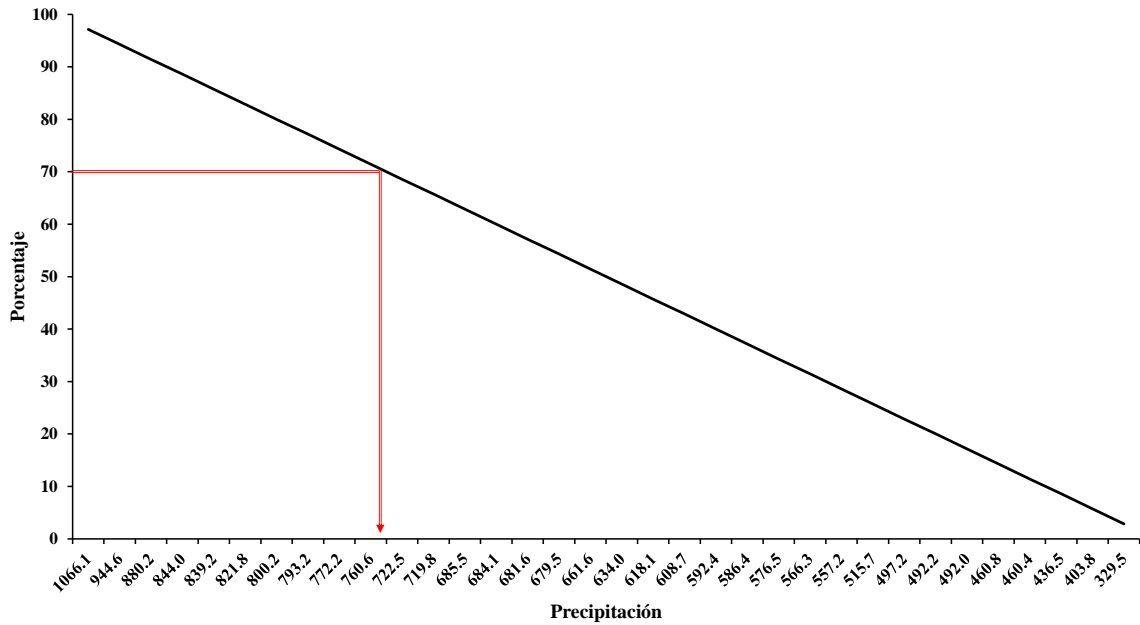
<b>Periodo invernal</b>	<b>Da Mota</b>	<b>Método Weinberger</b>
1987-1988	582.8	723.1
1988-1989	537.4	595.2
1989-1990	497.5	629.0
1990-1991	508.0	641.5
1991-1992	539.7	603.3
1992-1993	515.7	614.8
1993-1994	485.1	655.7
1994-1995	471.8	560.2
1995-1996	552.6	724.3
1996-1997	584.8	727.0
1997-1998	553.8	648.4
1998-1999	547.6	735.6
1999-2000	639.0	778.0
2000-2001	451.7	665.9
2001-2002	528.7	609.6
2002-2003	497.3	628.4
2003-2004	500.1	684.7
2004-2005	453.6	607.7
2005-2006	544.5	665.2
2006-2007	484.6	597.4
2007-2008	461.2	562.3
2008-2009	504.1	629.5
2009-2010	511.8	571.9
2010-2011	672.1	843.1
2011-2012	454.4	587.7
2012-2013	405.1	534.7
2013-2014	432.0	601.5
2014-2015	431.6	544.4
2015-2016	400.3	530.6
2016-2017	396.9	471.9
2017-2018	483.9	704.9
2018-2019	390.0	566.7
2019-2020	327.9	539.5
2020-2021	368.2	425.0
2021-2022	420.3	494.8
<b>Promedio</b>	<b>489.6</b>	<b>620.1</b>



**Figura 35. Horas frío acumuladas por el método de Da Mota y Dr. Weinberger. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

➤ **Probabilidad de ocurrencia de lluvia:** Se determinó con base a los métodos de distribución acumulada y de distribución normal, se utilizó un índice de probabilidad del 70% para ambos métodos, a continuación, se describen los resultados de cada uno de ellos.

a) **Distribución acumulada:** En la Figura 36, se presentan los datos de precipitación total anual registrados en la estación meteorológica Almaraz; se observa que al año precipitarán 748 mm o menos, con un 70% de ocurrencia. El que precipite mayores volúmenes representa menos del 30% de ocurrencia.



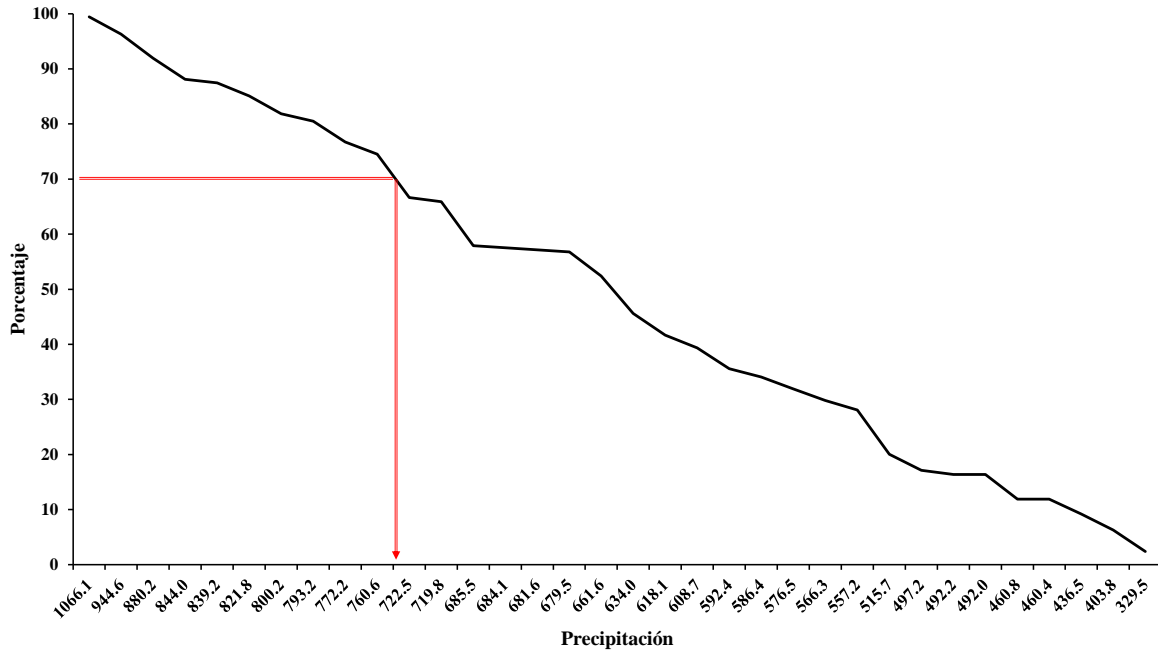
**Figura 36. Probabilidad de ocurrencia de lluvia por el método de distribución acumulada. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**b) Distribución normal:** Por el método de distribución normal (Figura 37) se obtuvo un volumen anual de 755 mm o menos con un 70% de ocurrencia. Asimismo, el que precipite mayores volúmenes representa menos del 30% de ocurrencia.

El valor promedio de precipitación anual calculado con los datos de 34 años de la estación meteorológica Almaraz es de 652.1 mm, que representa el 51% de probabilidad de que ocurra una precipitación igual o menor de ella, por ambos métodos.

La precipitación en la zona de estudio ocurre en la mitad caliente del año, por lo que la producción del ciclo otoño-invierno está sujeta a contar con riego que permita satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos en esta época del año, y con ello lograr una producción rentable.



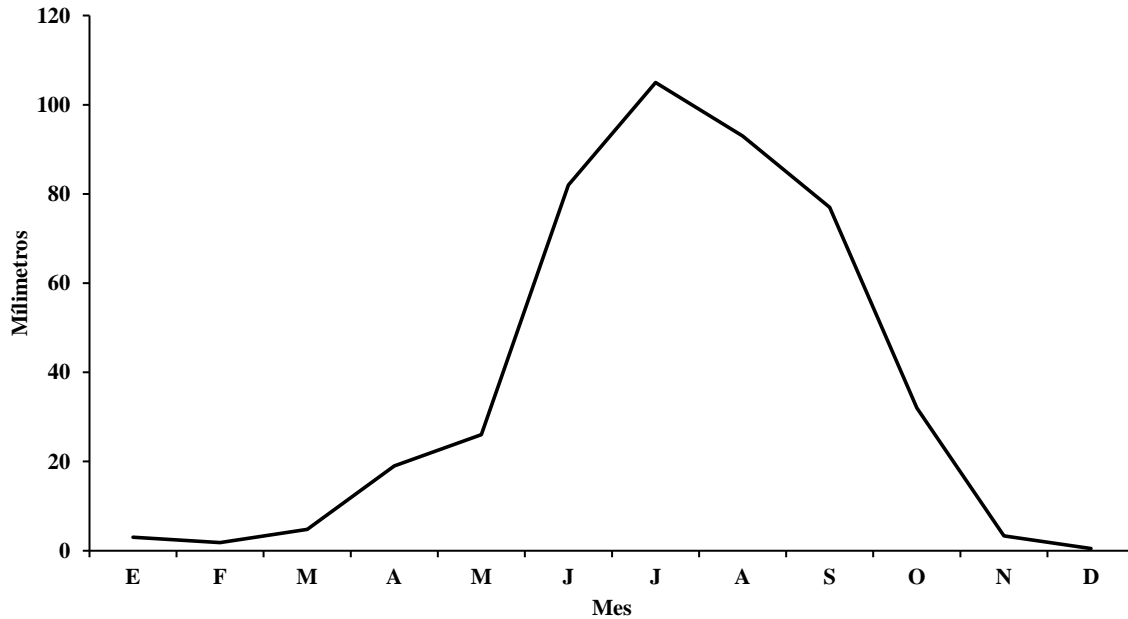


**Figura 37. Probabilidad de ocurrencia de lluvia por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Ahora bien, para conocer la probabilidad de ocurrencia de lluvia para cada mes, se determinó ésta por el método de distribución normal al 70% de probabilidad (Tabla 5); su tendencia en forma gráfica se presenta en la Figura 38.

**Tabla 5. Ocurrencia de lluvia mensual al 70% de probabilidad por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

Mes	Precipitación (mm)
E	3.0
F	1.8
M	4.8
A	19.0
M	26.0
J	82.0
J	105.0
A	93.0
S	77.0
O	32.0
N	3.3
D	0.5



**Figura 38. Ocurrencia de lluvia mensual al 70% de probabilidad por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

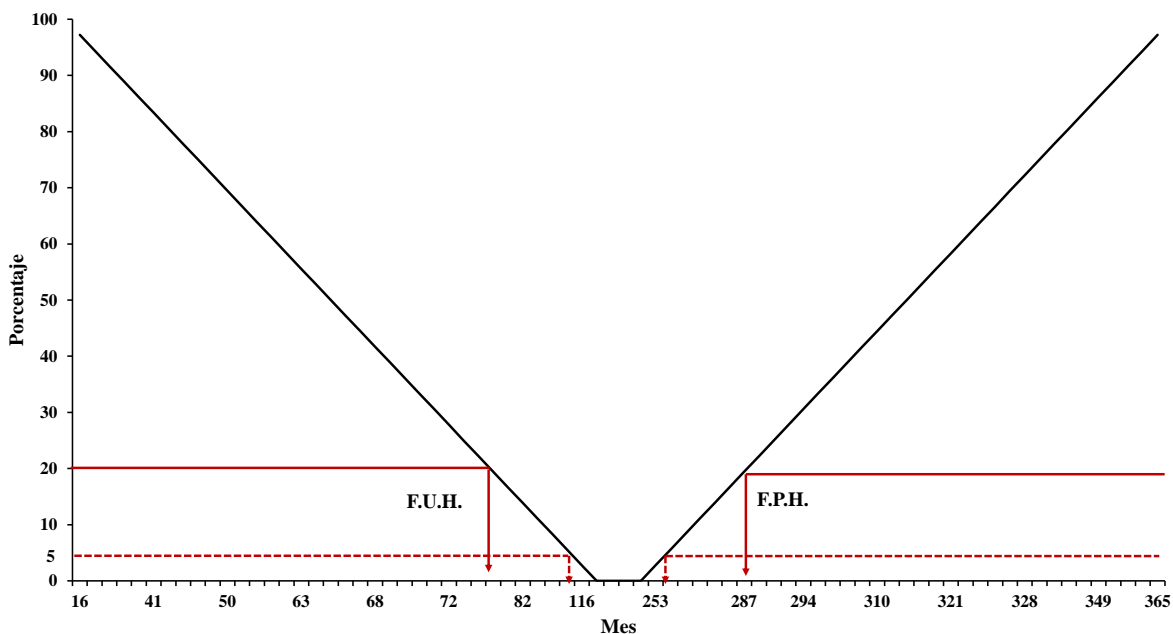
Esta probabilidad de lluvia mensual permite definir con mayor certidumbre el volumen de lluvia que se espera precipite mensualmente, volúmenes mayores sólo representan el 30% de probabilidad de ocurrencia. Asimismo, estos datos ayudan a programar las actividades de campo, como serían la fecha de siembra, aplicaciones de agroquímicos, cosecha, entre otros, y con ello ubicar a los cultivos en las mejores condiciones agroclimáticas.

➤ **Probabilidad de ocurrencia de helada.** El nombre de las heladas proviene de la época de ocurrencia con respecto a la estación del año en que se presentan, las invernales son las que menor daño provocan, en vista de que en esa época del año las plantas caducifolias se encuentran en dormancia y por lo tanto, soportan las bajas temperaturas, mientras que las heladas tardías y tempranas que se presentan en la primavera y en el otoño, son las que más perjudican en la agricultura ya que se presentan en épocas de intenso desarrollo de las etapas fenológicas, causando daños sobre la floración, foliación y fructificación en las plantas anuales. Asimismo,

interrumpen bruscamente el proceso de maduración de los frutos y la formación de yemas de las cuales dependerá la producción del año siguiente (Romo, 1989).

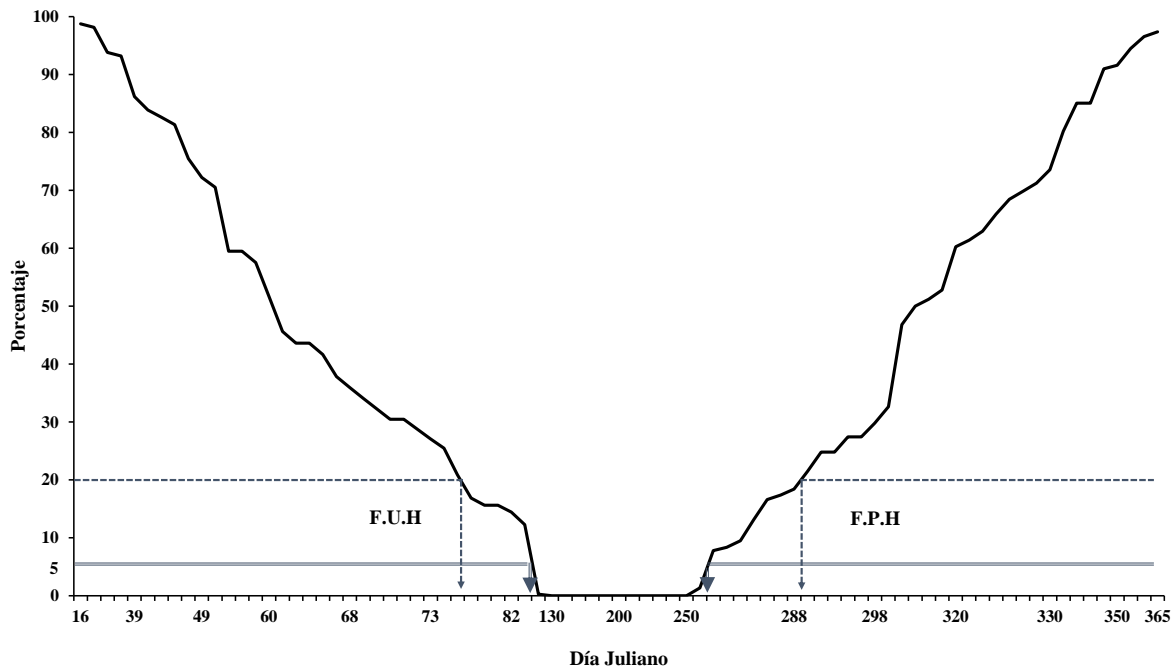
Este parámetro se determinó con base en los métodos de Da Mota, distribución normal, Pájaro y Ortiz, y Arteaga; a continuación, se describen los resultados de cada uno de ellos.

**a) Da Mota:** Para el método de Da Mota, la probabilidad de ocurrencia de helada se presenta en la Figura 39, en la cual, se obtuvo un periodo libre de heladas de 212 días, este periodo de bajo riesgo de helada es a partir del día 76 al 288 juliano que corresponden al 17 de marzo y día 15 de octubre, respectivamente, con el 20% de probabilidad de ocurrencia para cultivos anuales. Para el caso del 5% de probabilidad de ocurrencia de helada, la F.U.H es el día 25 de marzo y la F.P.H es el día 01 de octubre, esto es, los días 84 y 274 juliano, respectivamente, con un PLH de 190 días, para cultivos perennes.



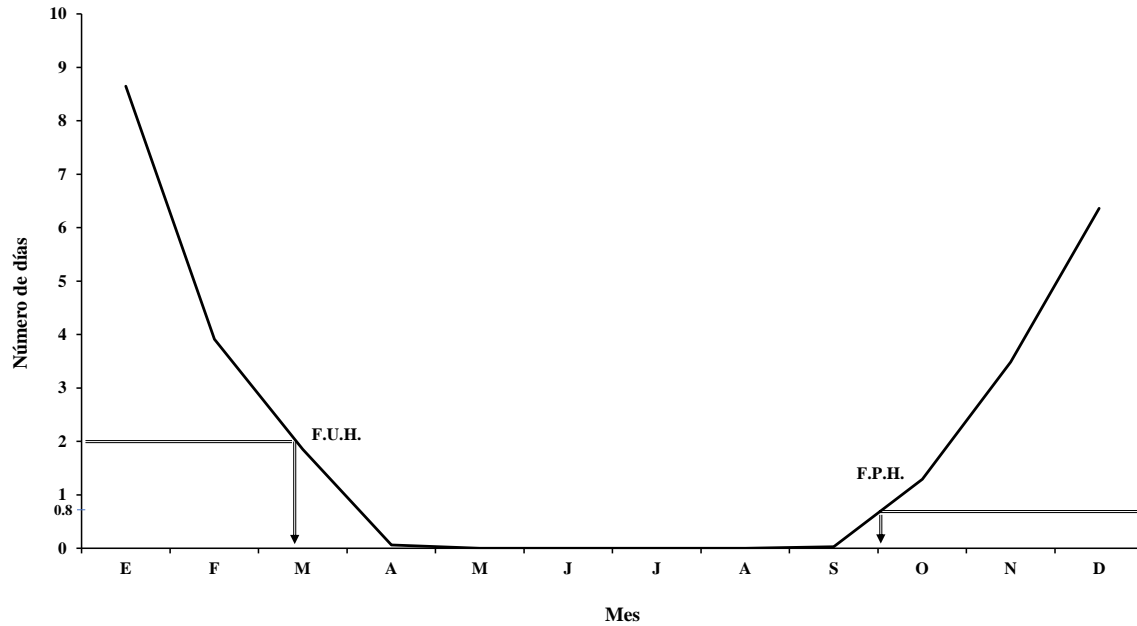
**Figura 39. Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Da Mota. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**b) Distribución normal:** Para el caso del método de distribución normal, el PLH inicia el día 77 juliano, correspondiente al 18 de marzo y finaliza el 290 juliano que es el 17 de octubre. Así, el periodo libre de heladas es de 213 días con el 20% de ocurrencia, esto es, 1 cada 5 años o bien 2 cada 10 años. La fecha de la última y primera helada con un 5% de probabilidad son el día 107 y 263 juliano, respectivamente, corresponden al 17 de abril y 20 de septiembre, respectivamente, con una duración del PLH de 156 días (Figura 40).



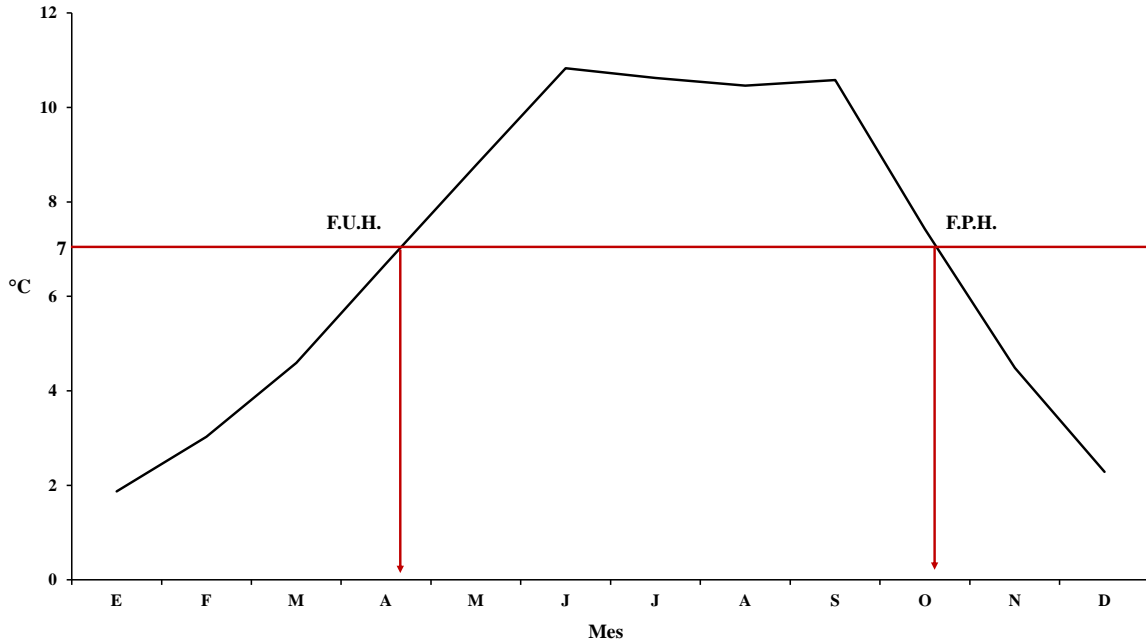
**Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de distribución normal. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**c) Método de Pájaro y Ortiz:** La probabilidad de ocurrencia de helada por el método de Pájaro y Ortiz (Figura 41) en la zona de estudio, indica que existe un PLH durante un poco más de 6 meses, es decir, del mes de marzo a octubre. Este método considera la primera helada a partir de un índice de 0.8 días con helada promedio mensual, y la última helada obtenida de un índice de 2 días con helada promedio mensual, y al interceptar con el eje de las ordenadas, se ubica con una probabilidad del 12.1% la última helada en la primera quincena de marzo y con 11.7% de probabilidad de la primera helada en los primeros días de octubre.



**Figura 41. Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Pájaro y Ortiz. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

**d) Método de Arteaga:** El último método que se utilizó para estimar la probabilidad de ocurrencia de heladas en la región, fue propuesto por Arteaga y lo aplicó en Valles Altos del centro del país. Este no define una fecha precisa de la ocurrencia de la primera y última helada, sólo considera para su determinación a la temperatura mínima promedio mensual (Figura 42), que al cruzar una línea 7 °C de temperatura y al interceptar el eje de la x, se obtiene con un 20% de probabilidad la presencia de la última y primera helada. Así, se observa que el PLH por este método tiene una duración de seis meses que comprende del mes de abril a octubre.



**Figura 42. Probabilidad de ocurrencia de helada, por el método de Arteaga. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli. México.**

¿Qué método utilizar?, dependerá de la cantidad de datos climáticos con que se cuente para poder aplicar uno u otro método. El PLH comprende del mes de marzo-abril al mes de octubre; en la Tabla 6 se presentan los datos obtenidos en cada método aplicado en este estudio.

**Tabla 6. Duración del periodo de bajo riesgo de helada, de acuerdo con el método y porcentaje de probabilidad. Estación meteorológica Almaraz Cuautitlán Izcalli, México.**

Método	Duración del PLH (días)	
	5%	20%
DaMota	190	212
Distribución normal	156	213
Pájaro y Ortíz	195	
Arteaga	180	

Los métodos de Arteaga, Pájaro y Ortiz no definen fechas específicas como está definido por los otros dos métodos, pero se obtuvo un valor medio entre los otros dos métodos y sus probabilidades correspondientes.

### 4.3. Fórmula climática

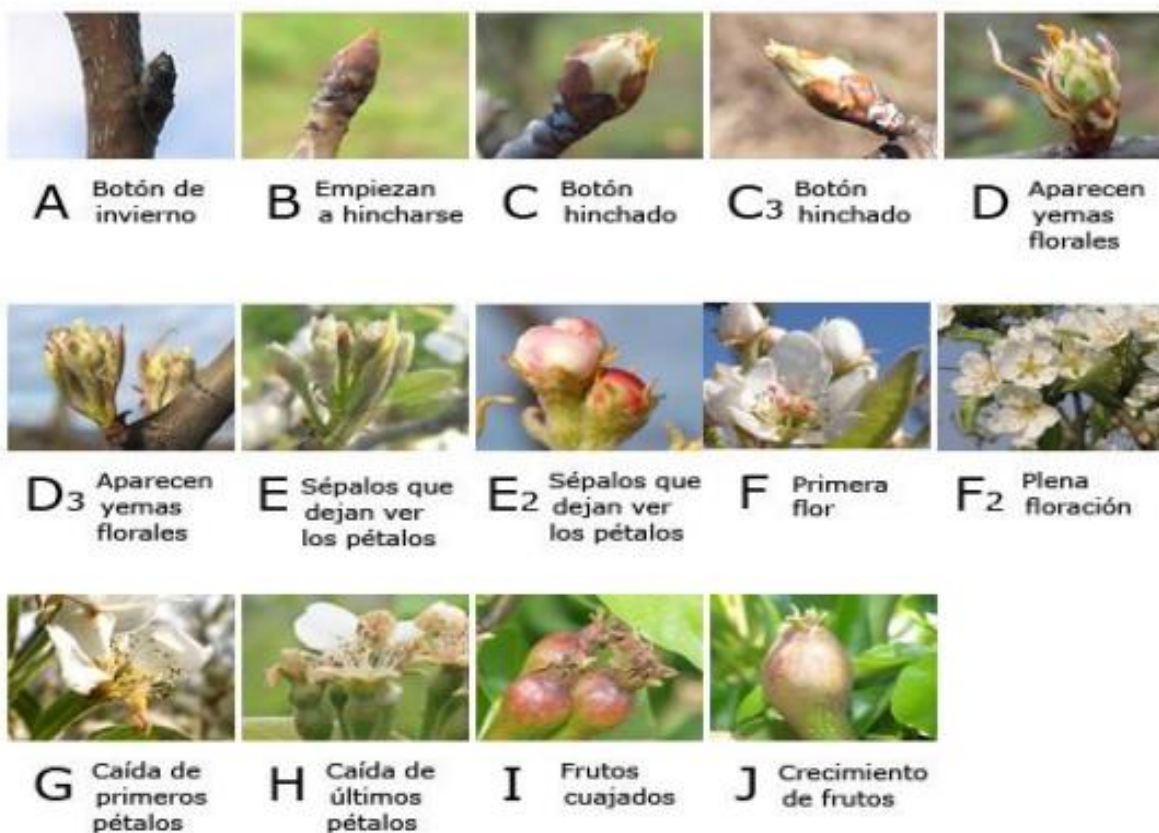
De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por García (1973) y de la información climática que en el presente trabajo se describió, la clasificación del clima de la zona es Cw (w<sub>0</sub>) b (i'). Esto significa que es un clima templado subhúmedo con lluvias de verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco largo, porcentaje de lluvia invernal de 4.71%, poca oscilación de temperatura, el mes más caliente es junio y sin sequía intraestival.

Los valores climáticos que derivaron en esta clasificación son los siguientes:

- Mes más frío: ..... Enero con 11.9 °C de temperatura media.
- Mes más caliente: ..... Junio con 18.0 °C de temperatura media.
- Temperatura media: ..... 15.4 °C.
- Oscilación de temperatura: ..... 6.1 °C.
- Precipitación anual: ..... 652.1 mm.
- Porcentaje de lluvia invernal: ..... 4.71 %.
- Cociente P/T: ..... 42.34
- Mes más lluvioso: ..... Julio con 128.5 mm.
- Mes más seco: ..... Diciembre con 5.0 mm.

#### 4.4. Programa de manejo del cultivo del peral

El periodo vegetativo anual en el peral se caracteriza por el desarrollo de diferentes fases fenológicas, inicia con la brotación de yemas florales y foliares, signo de la acumulación de horas frío necesarias para que esto suceda. El frío invernal se comienza a evaluar a partir del 50% de la defoliación momento en el cual el frutal entra en estado de reposo hasta la siguiente primavera. En la Figura 43 se aprecia la secuencia de estas fases fenológicas.



**Figura 43. Fases fenológicas del árbol de peral (Fleckinger, 1965 citado por De Paz, 2020).**

De Paz (2020), reportó los estados fenológicos del peral registrados durante el periodo de 2014-2019 en árboles de peral ubicados en el área de estudio, los cuales se demuestra la aparición y acumulación por fase y etapa fenológica; han sido agregados las observaciones de los años 2020 y 2021. En la Tabla 6, se presentan los datos de las observaciones realizadas en el periodo de estudio señalado de acuerdo con el calendario juliano.



**Tabla 7. Estados fenológicos del peral y fechas (día juliano) de aparición de acuerdo con el año evaluado. Cuautitlán Izcalli, México.**





<b>Estado / Año</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>Promedio</b>
<b>A:</b> Botón de invierno	49	40	40	38	40	40	41	43	41
<b>B:</b> Empiezan a hincharse	55	47	47	59	48	45	48	49	50
<b>C:</b> Botón hinchado	64	52	56	68	54	50	65	55	58
<b>C<sub>3</sub>:</b> Botón hinchado	66	54	60	69	70	57	72	64	64
<b>D:</b> Aparecen yemas florales	78	56	64	74	75	62	77	68	69
<b>D<sub>3</sub>:</b> Aparecen yemas florales	80	61	68	76	76	64	80	72	72
<b>E:</b> Sépalos que dejan ver pétalos	93	69	82	87	80	72	88	85	82
<b>E<sub>2</sub>:</b> Sépalos que dejan ver pétalos	95	71	89	94	88	86	92	90	88
<b>F:</b> Primera flor	98	79	96	97	90	90	94	95	92
<b>F<sub>2</sub>:</b> Plena floración	105	90	105	101	95	92	100	110	100
<b>G:</b> Caída de primeros pétalos	111	103	111	108	95	95	105	114	105
<b>H:</b> Caída de últimos pétalos	126	105	123	115	100	100	114	125	114
<b>I:</b> Frutos cuajados	133	115	130	137	105	103	120	133	122
<b>J:</b> Crecimiento de frutos	140	129	134	141	125	122	125	140	132
<b>K:</b> Cosecha								268	268

De acuerdo con Flores (2007) citado por De Paz (2020), el peral para romper su dormancia requiere entre 400 y 1,500 horas frío, por lo tanto, el peral variedad Kieffer establecida en el huerto de la FES Cuautitlán, y a la cual corresponden los datos citados en este apartado, cumple sus requerimientos de frío al contarse con un promedio de 489.6 horas frío, determinadas por el método Da Mota y 620.1 por el método del Dr. Weinberger, y con un promedio entre los dos métodos de 554.85 horas, en la zona de estudio.





El inicio de la brotación del peral se presenta en el mes de marzo, día 69 del calendario juliano; la cosecha se realiza en el mes de septiembre, a los 199 días en promedio después de la aparición de yemas florales.

En la Tabla 8 se presenta una propuesta de manejo del peral que se cita en este trabajo, con base a las condiciones meteorológicas descritas en esta investigación.





**Tabla 8. Programa de gestión en campo para el cultivo del peral (Elaboración propia).**

				
<b>BBCH</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>C3</b>
<b>Fase</b>	Botón de invierno	Empiezan a hincharse	Botón hinchado	Botón hinchado
<b>Etapa</b>	Letargo: yemas foliares y florales, cerradas y cubiertas de escamas marrón oscuro.	Comienzo del hinchado de yemas foliares, escamas alargadas, ligeramente coloreadas.	Fin del inchado de yemas vegetativas, algunas zonas cubiertas densamente de pelos.	Comienzo de la apertura de yemas; primeros ápices foliares verdes, sobre 5 mm por encima de las escamas .
<b>Día de aparición</b>	10 de febrero	19 de febrero	27 de febrero	05 de marzo
<b>Poda</b>				
<b>Fertilización</b>				<b>Fertilización</b>
<b>MIPE</b>	Homóptero ( <i>Ceresa bubalus</i> )			Homóptero ( <i>Psyla piri</i> )




Continuación Tabla 8.

				
BBCH	D	D3	E	E2
Fase	Aparecen yemas florales		Sépalos que dejan ver pétalos	
Etapa	Estadio oreja de ratón: ápices doliáres 10 mm sobre las escamas de las yemas, las yemas foliares se hinchan.	Fin del hinchado de yemas foliares, escamas ligeramente coloreadas.	Apertura de las yemas, flores visibles.	Estadio de balón la mayoría de las flores, los pétalos formando una bola hueca.
Día de aparición	10 de marzo	13 de marzo	23 de marzo	29 de marzo
Poda	Poda			
Fertilización	Fertilización			
	Pulgones ( <i>Dysaphis piri</i> , <i>Aphis pyrastris</i> y <i>Aphis pomi</i> ) Hemíptero ( <i>Janus compressus</i> )	Pulgones ( <i>Dysaphis piri</i> , <i>Aphis pyrastris</i> y <i>Aphis pomi</i> ) Hemíptero ( <i>Janus compressus</i> )	Homópero ( <i>Psyla piri</i> ) (	Homópero ( <i>Psyla piri</i> ).
MIPE	Homópero ( <i>Psyla piri</i> ).		Homópero ( <i>Psyla piri</i> ).	

Continuación Tabla 8.

BBCH	F	F2	G	H
				
<b>Fase</b>	Primera flor	Plena floración	Caída de primeros pétalos	Caída de últimos pétalos
<b>Etapa</b>	Primeras flores abiertas, el 10% de las flores están abiertas.	Alrededor del 50% de las flores están abiertas; caen los primeros pétalos.	Las flores empiezan a marchitarse, la mayoría de los pétalos se han caído.	Fin de la floración.
<b>Día de aparición</b>	2 de abril	10 de abril	15 de abril	24 de abril
<b>Poda</b>				
<b>Fertilización</b>	Homóptero ( <i>Hoplocampa brevis</i> ) Díptero ( <i>Contarina pyrivora</i> )	Díptero ( <i>Contarina pyrivora</i> ) Coleóptero ( <i>Anthonomus pyri</i> ).	Díptero ( <i>Dasyneura piri</i> )	Díptero ( <i>Dasyneura piri</i> ) Ectoparásito ( <i>Venturia pirina</i> ).
<b>MIPE</b>	( <i>Dasyneura piri</i> ).			

Continuación Tabla 8.

			
BBCH	I	J	K
<b>Fase</b>	Frutos cuajados	Crecimiento de frutos	<b>Periodo húmedo</b> Cosecha
<b>Etapa</b>	Diámetro del fruto hasta 10-20 mm, segunda caída de frutos.	Frutos erguidos, incremento de diámetro y empieza a aparecer el color propio de la variedad.	Frutos aptos para ser recolectados con buenas condiciones de almacenaje.
<b>Día de aparición</b>	2 de mayo	12 de mayo	25 de septiembre
<b>Poda</b>			
<b>Fertilización</b>	<b>Fertilización</b>		
	Homópero ( <i>Psyla piri</i> )	Homópero ( <i>Psyla piri</i> )	Ledidóptero ( <i>Laspeyresia pomonella</i> ).
	Ectoparásito ( <i>Venturia pirina</i> ).	Ledidóptero ( <i>Laspeyresia pomonella</i> )	
<b>MIPE</b>		Ectoparásito ( <i>Venturia pirina</i> ).	

Donde: BBCH= Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (Instituto Federal de Biología, Oficina Federal de Variedades Vegetales e Industria Química); MIPE= Manejo Integral de Plagas y Enfermedades.

Con base en esta información, el desarrollo fenológico del peral está determinado por la variación de los elementos climáticos a lo largo del año, lo que influye en el rendimiento de este frutal.

## V. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron los objetivos planteados, y los resultados del análisis de la información meteorológica recopilada diariamente en la estación meteorológica Almaraz, durante los últimos 34 años, son de gran importancia para la planeación oportuna de las actividades agrícolas que permitirá disminuir los efectos que pueden generar las condiciones climáticas adversas de la zona de estudio.
2. Los periodos de calentamiento y enfriamiento de la atmósfera están íntimamente relacionados con la tendencia de la radiación solar diaria, mensual y anual; ello genera una oscilación de temperatura en los mismos periodos de tiempo, tanto en el aire como en el suelo. El promedio anual de radiación solar es de  $467.47 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ; la temperatura del aire promedio anual es de  $15.4^\circ\text{C}$ .
3. La menor presencia de nubes al inicio de la primavera, genera un mayor número de horas de insolación, mientras que en el verano existe una disminución de esta insolación por la mayor nubosidad debido a la ocurrencia de la época de lluvias en la zona de estudio.
4. Asimismo, la relación de la evaporación y precipitación durante el año es inversa; en la época de primavera la evaporación se incrementa y disminuye gradualmente en verano. La evaporación media es de  $1,499.33 \text{ mm}$  anuales y la precipitación promedio anual es de  $612.1 \text{ mm}$ .
5. Al respecto de la ocurrencia de lluvias, la precipitación anual promedio obtenida corresponde al 51% de probabilidad de ocurrencia, y al considerar el 70% de probabilidad se obtuvo una precipitación igual o menor de  $722.5 \text{ mm}$  anuales; en este sentido, en la época de otoño-invierno, e inicio de la primavera, deberá contarse con agua de riego para poder desarrollar los sistemas de producción agrícola y cubrir las necesidades hídricas de los cultivos que tenga planeado producir.
6. El comportamiento de la presión atmosférica tiene una estrecha relación con la tendencia de la temperatura, la nubosidad y la humedad atmosférica; conforme se incrementa la humedad atmosférica y el aire es más denso, la presión aumenta también, y a su vez, la temperatura disminuye. Caso contrario, la temperatura aumenta gradualmente durante el día y la humedad y la presión atmosférica disminuyen. El valor promedio de la presión atmosférica es de  $585.6 \text{ mmHg}$  y el de la humedad atmosférica fue de  $64.5\%$ .

7. El viento tiene una dirección dominante promedio del noreste (NE), esto es, 57.9 grados; su velocidad varía de acuerdo con la altura, incrementando su recorrido a mayor altura.

8. La presencia de diversos fenómenos meteorológicos como son el rocío, tormenta eléctrica, granizo, niebla, entre otros, es frecuente y depende su ocurrencia de la época del año. El riesgo de la precipitación de granizo es bajo, en promedio tres días al año, sobre todo en la época de verano.

9. La determinación del periodo de bajo riesgo de helada se realizó por varios métodos, y fue el de distribución normal permitió definir las fechas de ocurrencia de última y primera helada con más precisión. En el área de influencia de la estación meteorológica su duración es de 212 días al año, que comprende del mes de marzo al de octubre, lo que favorece la producción de cultivos de ciclo biológico menor de 200 días en la época de primavera-verano.

10. La acumulación potencial de unidades calor al año se encuentra en valores de 3,985.2; 3,437.7; 2,707.7; 1,977.7 UT, con temperaturas base de 4.5, 6.0, 8.0 y 10 °C, respectivamente. Con una temperatura base de 8 °C existe la acumulación de calor suficiente para el crecimiento y desarrollo de cultivos de la zona templada como son frijol, maíz, girasol, haba, entre otros.

11. La evapotranspiración potencial promedio por el método del tanque “Tipo A” es de 1,124.50 mm anuales, casi el doble de la precipitación registrada en la zona, lo que confirma la necesidad de contar con agua de riego para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos en la época se sequía.

12. La estación de crecimiento por disponibilidad de humedad es de tipo normal, con un periodo húmedo de 4 meses que abarca del mes de junio a octubre, para adelantar el establecimiento de cultivos de temporal será necesario contar con riegos de auxilio lo que permitirá contar con las condiciones de humedad favorable para su crecimiento y desarrollo.

13. Por disponibilidad de temperatura, la estación de crecimiento tiene un periodo de bajo riesgo de helada de 213 días al 20% para cultivos anuales, a partir del 18 de marzo al 17 de octubre; para cultivos perennes con una probabilidad del 5%, el PLH es de 156 días, lo que da inicio el 17 de abril al 20 de septiembre.

14. Las horas frío acumuladas fueron 555 horas, por lo que, para el establecimiento de huertos frutícolas, se deben manejar especies de árboles frutales caducifolios que cubran sus necesidades de frío con este valor.

15. Los valores de los elementos de clima obtenidos permitieron clasificar el clima en la zona de estudio como: templado subhúmedo con lluvias en verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco largo, con un porcentaje de lluvia invernal de 4.71%, poca oscilación térmica, el mes más caliente es junio y sin sequía intraestival, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García.

16. La estación Almaraz se considera de tipo meteorológica, al no contar con equipo para medir evapotranspiración real, no puede considerarse agrometeorológica, a pesar de tener una área de campo para realizar observaciones fenológicas en cultivos agrícolas, sin embargo, durante muchos años ha cumplido un gran valor de apoyo para la investigación, docencia y planeación de las actividades agropecuarias que benefician a la comunidad de esta Facultad.

17. La hipótesis que se planteó sobre el desarrollo fenológico que está determinado por la variación de los elementos climáticos, lo que a su vez influye en el rendimiento de los cultivos agrícolas, se acepta, puesto que, al analizar los datos de la fenología del peral reportados en este estudio, se puede constatar que el desarrollo fenológico si es afectado por dichas variaciones.

18. Finalmente, el análisis de la información meteorológica aquí descrito deja evidencia de la variabilidad climática durante estos 34 años de trabajo. Se sugiere continuar con el trabajo que se desarrolla en la estación meteorológica Almaraz, para incrementar el banco de datos, además realizar otros estudios que ayuden a comprender los cambios que sufre el tiempo atmosférico y su relación con las actividades agrícolas en su más amplia expresión.



## VI. LITERATURA CITADA

1. Aguilera, C.M., Martínez, E.R. 1990. Relaciones de Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. 2da edición. Universidad de Autónoma de Chapingo. Depto. Irrigación. Chapingo. Méx. 128 p.
2. Ahmad, L., Kanth, R.H., Parvaze, S., Mahdi. 2017. Experimental Agrometeorology: A Practical Manual. Springer. Srinagar, India. 159 pp.
3. Albareda, M., Antrás, A., Bator, J., Biosca, A., Calaf, M., Capella, J., Cuerda, J., Daroguy, G., de Cabo, J., Durán, M., Florit, J., Font, M., Fullá, J., Garay, J., García, V.C., Giménez, F.J., Gual, A., Guisán, S., Marco, M., Muniesa, B., Pierre, P.J., París, J., Riera, S., Riera, A., Rovira, A., Sanahuja, J.M., Villalba, M. 1998. Enciclopedia Temática Océano. Vol. 1. Geografía general y Geografía 93esarrollo93. Editorial Océano. 208 pp.
4. Allen, R.G., Pruitt, W.O., Jensen, M.E. 1991. Lysimeters for Evapotranspiration and Measurements. Proc. Of the ASCE Int. Symp. On Lysimetry, Honolulu, HA, ASCE, New York, Estados Unidos de America. 181 pp.
5. Allen, R.G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. En: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Fecha de consulta el 28 de enero de 2022.
6. Almorox, J. s/f. Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETP y Etr. Evapotranspiración potencial según Thornthwaite. [http://ocw.upm.es/pluginfile.php/675/mod\\_label/intro/metodosevapotranspiraciones.pdf](http://ocw.upm.es/pluginfile.php/675/mod_label/intro/metodosevapotranspiraciones.pdf). Fecha de consulta el 28 de enero de 2022.
7. Arbat, B.M. 2015. Distribución de temperatura y velocidad de embalses. Análisis numérico-experimental aplicado en los embalses de Sou (Ter) y Ribarroja (Ebro). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 95 pp.
8. Arteaga, R.R., Vázquez, P.M.A., Coras, M.P.M., Ángeles, M.V. 2006. Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. Ingeniería hidráulica en México. 68 pp.
9. Barrios, B.A.C. 2017. Evapotranspiración de un cafetal bajo sombra: separado la contribución del estrato de cafetos y árboles con el método de Eddy Covarianza. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. 51 pp.
10. Cardoso, J.C. 2011. Agrometeorología, la importancia de su desarrollo técnico y los sistemas de información y cooperación internacional. En:

<http://parlatino.org/pdf/comisiones/agricultura/exposicion/xv-agrometeorologia-pma-24-mar-2011.pdf>. Fecha de consulta el 15 de noviembre de 2021.

11. Chouard, P. 1960. Vernalization and its relation to dormancy. Annual Review. Plant Physiology, 11: 191-238.

12. Cisneros, A.R. 2003. Apuntes de la materia de Riego y Drenaje. (Versión digital). Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y Área Agrogeodésica. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 164 pp.

13. Crespo, P. G. 2009. Siacer: sistema para la adaptabilidad de cultivos y estimación de rendimiento potenciales. En: <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/agm/rend1.htm>. Fecha de consulta el 28 de diciembre de 2021.

14. Day, P. C. 1911. Frost data of the United States and Length of the Crop-growing season. Weather Bur. Bul. V., Washington.

15. De Paz, Q.V. 2020. Acumulación de frío invernal en la zona de Cuautitlán Izcalli, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 52 pp

16. Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper No. 24 (rev) FAO, Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. 144 pp.

17. FAO (Food and Agriculture Organization). 1997. Zonificación agroecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. En: <http://www.fao.org/docrep/w2962s/w2962s00.htm>. Fecha de consulta el 29 de noviembre de 2021.

18. FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje 56. Roma, Italia. 323 pp.

19. FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología). 2004. Meteorología y Climatología. Villena Artes Gráficas. España. 170 pp.

20. Ferreras, F.C. 2002. Agroclimatología. En: [www.untumbes.edu.pe/vcs/biblioteca/document/varioslibros/AgroclimatoloIa.pdf](http://www.untumbes.edu.pe/vcs/biblioteca/document/varioslibros/AgroclimatoloIa.pdf). Fecha de consulta el 14 de septiembre de 2021.

21. Fertibox. 2020. Horas frío en cultivo de frutales. En: [www.fertibox.net/](http://www.fertibox.net/). Fecha de consulta el 28 de noviembre de 2021.

22. Flores, F.F.G. 1998. Caracterización agroclimática de la zona de influencia de la estación meteorológica Almaraz, en Cuautitlán Izcalli, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 99 pp.
23. Flores, P.C. 2007. Requerimientos de frío en frutales, efectos negativos sobre la producción de fruta (Primera parte). Revista de agromensajes de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Rosario. Argentina. 2 p.
24. Frére, M., Popov, G.F. 1980. Pronóstico de cosechas basado en datos agrometeorológicos. Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal Núm 2. Roma. 17 pp.
25. García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, 2ª Edición. UNAM, México. 246 pp.
26. García, E. 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 76 pp.
27. García, P.F., Cruz, M.I.R. 2008. Fechas de inicio y terminación de la temporada de lluvias en la región Pacífico Norte. Ingeniería hidráulica de México. 188 pp.
28. Garduño, R. 1994. El veleidoso clima. Fondo de Cultura Económica SA. de C.V. México. Ciudad de México.
29. Gobierno de Aragón. 2010. Necesidades de frío invernal de los frutales caducifolios. Informaciones Técnicas. Núm. 224. Dirección General de Desarrollo Rural. Centro de Transferencia Agroalimentaria. España. 8 p.
30. Gobierno del Estado de México. 2021. Nuestros municipios. División política. En: [https://edomex.gob.mx/nuestros\\_municipios](https://edomex.gob.mx/nuestros_municipios). Fecha de consulta el 10 de junio de 2022.
31. Gómez, R.J.C. 2017. Medio ambiente y agricultura. En: [http://huertofenologico.filos.unam.mx/files/2017/05/MedioAmbiente\\_y\\_Agricultura.pdf](http://huertofenologico.filos.unam.mx/files/2017/05/MedioAmbiente_y_Agricultura.pdf). Fecha de consulta el 27 de septiembre de 2021.
32. Grajales, M.O.M.M. 2004. Fisiología Vegetal. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Mexico. 85 pp.
33. Grassi, C.B.A. 1983. Riesgo de primeras y últimas heladas en Puebla y Tlaxcala respecto a los cultivos básicos. Tesis en Maestría en Ciencias. Programa de Agrometeorología. Chapingo. México.
34. Guttman, N.B. 1989. Statistical descriptors of climate. Bull. Amer. Met. Soc., 70: 602-607.

35. Hernández, J.G., Medina, B.M. 2012. Índices y umbrales térmicos e índices fitoclimáticos. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 7 pp.
36. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2014. Estación de Crecimiento disponible para los cultivos en la región sureste del estado de Coahuila. México. Clave INIFAD/CIRNE/ A-540. 22 pp.
37. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2017. Clima y productividad. Estación Experimental Agroforestal Esquel. En: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_eef\\_esquel\\_clima\\_y\\_productividad.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_eef_esquel_clima_y_productividad.pdf). Fecha de consulta el 30 de septiembre de 2021.
38. Íñiguez, C.M., Ojeda, B.W., Díaz, D.C., Sifuentes, I.E. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1): 101-114.
39. Klein, P., Sanson, J. 1928. *Meteorología y Física Agrícolas*. Salvat Editores. S.A. Barcelona, España. 300 pp.
40. Laguna, C.A. 2017. Estación de crecimiento. Cátedra de Fisiotecnia Vegetal. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. Versión digital. En: [view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3a%2F%2Fri.uaemex.mx%2Fbitstream%2Fhandle%2F20.500.11799%2F70417%2Fsecme-4537\\_1.pptx%3Bjsessionid%3DEF03F304739A0896749DBBF65EE81C4F%3Fsequence%3D1&wdOrigin=BROWSELINK](view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3a%2F%2Fri.uaemex.mx%2Fbitstream%2Fhandle%2F20.500.11799%2F70417%2Fsecme-4537_1.pptx%3Bjsessionid%3DEF03F304739A0896749DBBF65EE81C4F%3Fsequence%3D1&wdOrigin=BROWSELINK). Fecha de consulta el 29 de noviembre de 2021.
41. Lang, G., Early, J., Martin, G., Darrell, R. 1987. Endo, para, and ecodormancy: Physiological terminology and classification for dormancy research. *HortSci*. 22: 371-377.
42. Lindzen, R., Chapman, S. 1970. *Atmosferic Tides*. D. Reidel. 200 pp.
43. López, P. 2021. Solsticio de verano: toda la información que debes tener. Universidad Nacional Autónoma de México. *Gaceta UNAM*, 5(279) (jun. 17, 2021). México, UNAM. Versión digital.
44. Lowry, L. 1980. Compendio de apuntes de climatología para el personal meteorológico de la clase III. Organización Meteorológica Mundial. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza. 181 pp.
45. Manzano, A.M. 2008. Práctica 1: Cálculo del balance hídrico en el suelo mediante el método de Thornthwaite. Cátedra de la asignatura de Hidrología subterránea (ITOP)/ Hidrogeología. Formato digital. En: Microsoft Word – PRÁCTICA1 BALANCE HÍDRICO SUELO\_explicación.doc (upct.es). Fecha de consulta el 27 de enero de 2022.

46. Martín, C.C.R., Sosa, R.J., Maass, M.M., Luna, R.J.J., Meráz, J.A.J., Flores, A.E. 2015. Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. *Terra Latinoamérica*, 33(1): 17-26.
47. Martínez, B.C. 2012. Estadística y muestreo. 13ava. edición. Ecoe. Bogotá, Colombia. 878 pp.
48. Medina, G.G., Ruiz, C.J.A., Díaz, P.G., Serrano, A.V. 2008. Probabilidad de ocurrencia de heladas en el estado de Zacatecas. Libro Técnico No. 8. INIFAP-CIRNC-CEZ.SAGARPA. México. 260 pp.
49. Medina, G.G., Grageda, G.J., Ruiz, C.J.A., Baez, G.A.D. 2008. Uso de Estaciones en la Agricultura. Folleto Informativo Núm. 50. INIFAD-CIR NORTE-CENTRO. México. 14 pp.
50. Maderey, R.L. 1979. Geografía de la atmósfera. Apuntes realizados de acuerdo con el programa vigente de la Licenciatura de Geografía, Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Editorial Universidad Nacional Autónoma de México. 56 pp.
51. Mercado, M.G., Echeverría, V.Y.U., Chávez, P.S., Adrián, S.P., Herrera, R.H., Valencia, I.C.E. 2013. Contraste de parámetros físicos y químicos de un suelo con manejo orgánico vs manejo convencional. Memorias del XXXVIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. La Paz, B.C.S. México.
52. Mercado, M.G., Ramírez, R.M., Vizcarra, H.I., López, A.H., López, V.D.M., Granados, M.A K., Reyes, L.D., Chaires, M.B.E. 2014. Distribución y probabilidad de la lluvia en Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Memorias del XXIII del Congreso Mexicano y VIII Internacional de Meteorología. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México.
53. Mercado, M.G. 2020. Índices de temperatura. Cátedra de Producción de Frutales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. México. Versión digital.
54. Millar, A.A. 1993. Determinación de la evapotranspiración. En Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Ed.) Manejo de Agua y Producción Agrícola. Universidad de Concepción Facultad de Ingeniería Agrícola.
55. Montaner, S.M.E., Sánchez, A.S.E. 1988. Aproximación por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. Papeles de Geografía. No. 14. En: [https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjjJfmp-\\_1AhW6lGoFHch5AyQQFnoECAUQAQ&url=https%3a%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F105434.pdf&usq=AovVaw2ldXU9SwWeMvVmLlyRa-OS](https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjjJfmp-_1AhW6lGoFHch5AyQQFnoECAUQAQ&url=https%3a%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F105434.pdf&usq=AovVaw2ldXU9SwWeMvVmLlyRa-OS). Fecha de consulta el 25 de enero de 2022.
56. Ojeda, W., Iñiguez, M., Sifuentes, E., Ontiveros, R., López, B. 2012. Identificación de un portafolio de medidas de adaptación al cambio climático para el sector agrícola, mediante la

evaluación del riesgo actual y el proyectado a 2030. RFQ-104-2011. Informe final. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 319 pp.

57. OMM/UNESCO (Organización Meteorológica Mundial/ Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1992. Vocabulario meteorológico internacional. 2ª edición. WMO/OMM/BMO-No.182. ISBN: 978-92-63-02182-3. 802 pp.

58. OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2007. Funciones de las Normales Climatológicas en un clima cambiante. En: [library.wmo.int](http://library.wmo.int). Fecha de consulta 17 de octubre de 2021.

59. Ortiz, S.C.A. 1987. Elementos de Agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. 3ª edición. Universidad Autónoma de Chapingo, México. 57 pp.

60. Ovejero, S.J. 1999. Diccionario Selecto Enciclopédico. Editorial Ibalpe Internacional de Ediciones de México, S.A de C.V. México. 1311 pp.

61. Pájaro, D.H., Ortiz, S.C.A. 1988. Curso Taller sobre Zonificación Agroecológica de Cultivos. Centro de edafología. Colegios de Posgraduados. Chapingo. México.

62. Pérez, B.P.M., Amador, A.J.A., Alfaro, E.J. 2017. Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el 98esarro de Thornthwaite. *Revista de Climatología*, 17: 1-16.

63. Ponce, V.M. 1989. *Engineering Hydrology, Principles and Practices*, Edit. Prentice Hall. USA. 51 pp.

64. Radio UdeC. 2021. Primera estación meteorológica en Arauco apoyará el desarrollo agrícola. En: <https://www.radioudec.cl/primera-estacion-meteorologica-en-arauco-apoyara-el-desarrollo-agricola/>. Fecha de consulta el 18 de noviembre de 2021.

65. Rodríguez, M.V., Ramos, G.F. 2017. La agrometeorología. De la ciencia a la producción de cultivos en campo. *Productores de hortalizas*, 24: 26.

66. Rodríguez, J.R.M, Benito, C.A., Portela, L.A. 2004. *Meteorología y Climatología*. Editorial FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología). 170 pp.

6. Rodríguez, R.M. 2014. Normal climática de la Estación Meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México (1987-2013). Tesis de Licenciatura Ingeniería Agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. 82 pp.

68. Romo, G. J. y Arteaga, R. R. 1989. *Meteorología Agrícola*. 2ª Edición. UACH. México. 442 pp.

69. Sánchez, R.F.J. s/f. Evapotranspiración. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca, España. 9 pp.
70. SensorGo. 2020. Estaciones meteorológicas. ¿Qué son y cómo funcionan? En: <https://sensorgo.mx/estaciones-meteorologicas/>. Fecha de consulta el 14 de septiembre de 2021.
71. Soler, F.M.L. 2015. Agrometeorología, concepto, definición, importancia. Cátedra de climatología y Fenología agrícola, Universidad Nacional de Tucumán. En: <https://slideplayer.es/slide/5399550>. Fecha de consulta el 30 de septiembre de 2021.
72. TecNM (Tecnológico Nacional de México). S/f. Temperatura del suelo. Apuntes de la carrera de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable, Instituto Tecnológico Superior de Hopelchén, Campeche. México. En: <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r10>. Fecha de consulta el 30 de enero de 2022.
73. Tejeda, M.A., Méndez, P.I., Rodríguez, N., Tejeda, Z.E. 2018. La humedad de la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Universidad de Colima, Colima, México. 267 pp.
74. Torres, R.E. 1995. Agrometeorología. Editorial Trillas. México. 154 pp.
75. Trejo, V.R. 2004. Determinación de la normal climática de la Estación Meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 86 pp.
76. UNLP (Universidad Nacional de La Plata). 2017. Aspectos climáticos de la temperatura del suelo. Aula virtual de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de la Plata, Buenos Aires, Argentina. En: <https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/mod/resource/view.php?id=31>. Fecha de consulta el 15 de enero de 2022.
77. Van Bavel, C.H.M. 1961. Lysimetric measurements of evaporation in the eastern United States. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 138-141.
78. Villalobos, M.F.J., Fereres, C.E. 2017. Fitotecnia: principios de agronomía para una agricultura sostenible. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 605 pp.
79. Villalpando, I. F.J., Ruiz, C.A. 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su Uso en la Agricultura. Editorial UTEHA. México.

# **ANEXOS**



**Anexo 1. Días del Calendario Juliano (Arbat, 2015).**

<b>Día</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29	-	88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30	-	89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31	-	90	-	151	-	212	243	-	304	-	365

**Anexo 2. Tabla de Horas frío por el método del Dr. Weinberger (Villalpando, 1993).**

<b>T. Prom. (°C) Dic-Ene</b>	<b>Horas Frío</b>	<b>T. Prom. (°C) Dic-Ene</b>	<b>Horas Frío</b>	<b>T. Prom. (°C) Dic-Ene</b>	<b>Horas Frío</b>	<b>T. Prom. (°C) Dic-Ene</b>	<b>Horas Frío</b>
17.1	50	13.9	370	11.1	690	8.6	1,010
17	60	13.8	380	11	700	8.5	1,020
16.9	70	13.7	390	10.9	710	8.4	1,030
16.8	80	13.6	400	10.9	720	8.4	1,040
16.7	90	13.5	410	10.8	730	8.3	1,050
16.6	100	13.4	420	10.7	740	8.2	1,060
16.5	110	13.3	430	10.6	750	8.2	1,070
16.4	120	13.2	440	10.5	760	8.1	1,080
16.3	130	13.1	450	10.4	770	8	1,090
16.2	140	13	460	10.4	780	8	1,100
16.1	150	12.9	470	10.3	790	7.9	1,110
16	160	12.9	480	10.2	800	7.8	1,120
15.9	170	12.8	490	10.1	810	7.7	1,130
15.8	180	12.7	500	10	820	7.7	1,140
15.7	190	12.6	510	10	830	7.6	1,150
15.6	200	12.6	520	9.9	840	7.5	1,160
15.5	210	12.4	530	9.8	850	7.5	1,170
15.4	220	12.3	540	9.7	860	7.4	1,180
15.3	230	12.2	550	9.6	870	7.3	1,190
15.2	240	12.1	560	9.6	880	7.2	1,200
15.1	250	12	570	9.5	890	7.2	1,210
15	260	12	580	9.4	900	7.1	1,220
14.9	270	11.9	590	9.3	910	7	1,230
14.8	280	11.8	600	9.2	920	7	1,240
14.7	290	11.7	610	9.2	930	6.9	1,250
14.6	300	11.6	620	9.1	940	6.8	1,260
14.5	310	11.6	630	9	950	6.8	1,270
14.4	320	11.4	640	8.9	960	6.7	1,280
14.3	330	11.4	650	8.9	970	6.7	1,290
14.2	340	11.3	660	8.8	980	6.6	1,300
14.1	350	11.2	670	8.7	990	6.5	1,310
14	360	11.2	680	8.6	1000	6.5	1,320
						6.4	1,330
						6.4	1,340
						6.3	1,350

**Anexo 3. Datos climáticos promedio mensual de la estación meteorológica Almaraz.**

Mes	Temperatura				Horas de insolación (horas)	Radiación solar (cal cm <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	Presión atmosférica (mmHg)
	media (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)	ETP (mm)			
E	11.9	7.6	94.1	5.7	8.3	401.89	586.2
F	13.4	10.5	115.5	7.8	9.2	465.26	585.1
M	15.1	12.6	157.3	9.4	9.1	509.10	584.8
A	16.9	30.0	165.2	22.5	8.9	537.43	584.3
M	17.9	51.2	171.1	38.4	8.9	545.22	585.1
J	18.0	113.3	144.9	84.9	7.4	501.79	585.2
J	17.2	128.5	138.3	96.4	7.3	499.75	586.5
A	17.1	116.3	126.8	87.2	7.5	494.62	586.2
S	16.8	105.6	105.8	79.2	6.3	440.68	585.4
O	15.1	59.1	102.4	44.3	7.3	423.27	585.9
N	13.4	12.4	89.1	9.3	8.1	399.71	586.4
D	12.2	5.0	88.8	3.8	8.5	390.95	586.3

Mes	Viento		Humedad atmosférica media (%)	Días con		
	Velocidad (km hr <sup>-1</sup> )	Dirección (grados)		Helada	Granizo	Niebla
E	5.0	58.2	62.0	8.6	0.0	4.6
F	6.0	78.1	60.4	3.9	0.3	2.9
M	6.9	62.8	58.2	1.9	0.2	2.0
A	6.5	61.4	57.3	0.1	0.3	1.7
M	6.6	52.0	59.7	0.0	0.5	1.8
J	6.7	53.2	67.0	0.0	0.5	4.2
J	5.7	45.0	69.9	0.0	0.5	4.3
A	5.4	57.9	70.3	0.0	0.2	5.4
S	5.4	58.2	72.3	0.0	0.2	5.4
O	5.3	50.3	68.9	1.3	0.3	7.4
N	4.8	58.6	65.3	3.5	0.1	6.9
D	4.3	58.6	62.9	6.4	0.0	4.0

Continuación Anexo 3.

Mes	Días con			Tormenta eléctrica
	Pp Apreciable	pp Inapreciable	Rocío	
E	2.4	0.7	19.0	0.4
F	3.3	0.9	17.3	1.4
M	4.3	2.1	16.0	2.8
A	7.4	2.1	14.4	4.0
M	10.4	2.4	18.6	6.3
J	14.8	1.7	21.9	7.9
J	18.4	1.0	27.2	8.9
A	18.5	1.7	28.2	7.1
S	15.7	1.5	26.8	5.4
O	9.4	1.3	27.5	3.4
N	3.6	0.8	23.0	1.3
D	1.6	0.6	22.1	0.2

**Anexo 4. Probabilidad de hallar un valor al azar de  $Z = (Y - \mu)$  (Martínez, 2012).**

<b>z</b>	<b>0</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>
0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
3.6	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
3.9	0.0000									

**Anexo 5. Requerimiento de horas frío de algunas variedades de árboles frutales caducifolios  
(Calderón, 1977 y Gobierno de Aragón, 2010, citado por Rodríguez (2014)).**

<b>Especie</b>	<b>Variedad</b>	<b>Requerimiento de Horas Frío</b>	<b>Clasificación</b>
Manzano	Rome Beauty	1, 000 – 1, 300	Muy alto
	Golden	800 – 1, 000	Alto
	Delicious	700 - 800	Medio
	Red Delicious	600 - 700	Bajo
	Winter Banana	500	Muy bajo
	May Flower	1, 000 – 1, 300	Muy alto
	Fortuna	800 - 850	Alto
Durazno	May Gold	650 - 750	
	Nancy	1, 000 – 1, 050	Muy alto
	Royal	700 - 850	Alto
Chabacano	Royal Fino	650 - 750	Medio
	Klabi	600 - 700	Bajo
	Valencianos	500 - 600	Muy bajo
	Williams	1, 000 – 1, 300	Muy Alto
	Beurre Hardy	950 – 1, 050	Alto
Peral	Winter Nellis	650 - 750	Medio
	Orient	500 - 600	Muy bajo
	Paraíso	400 - 500	Muy bajo
	Red Heart	850 - 950	Alto
	Ozark Premier	800 - 900	Alto
Ciruelo	Purple King	700 - 800	Medio
	Mariposa	650 - 750	Bajo
	Gota de Oro	600 - 700	Bajo
	Lambert	900 – 1, 100	Muy alto
	Chapman	850 - 950	Alto
Cerezo	Tixerain	750 - 850	Medio
	Precoz de Bale	750 - 850	Medio
	Cristobalina	600 - 700	Bajo
Nogal		400 – 1, 500	Alto
Vid		100 – 1, 400	Medio