



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

---

---

**Fenología de avena forrajera en Cuautitlán**  
**Izcalli, Estado de México**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA AGRÍCOLA**

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

**SALMA CASAREZ LÓPEZ**

**ASESOR: Dr. GUSTAVO MERCADO MANCERA**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
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**

Fenología de avena forrajera en Cuautitlán Izcalli, Estado de México

Que presenta la pasante: **Salma Casarez López**.  
Con número de cuenta: **417039590** 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 10 de agosto de 2022.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	Mtro. Vicente Silva Carrillo	
<b>VOCAL</b>	Ing. Aurelio Valdez López	
<b>SECRETARIO</b>	Dr. Gustavo Mercado Mancera	
<b>1er. SUPLENTE</b>	Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza	
<b>2do. SUPLENTE</b>	Mtro. Rubén Vargas Marquez	

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

MCVB/ntm\*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a su vez, a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por haberme permitido ser parte de la máxima casa de estudios, dándome las herramientas necesarias para mi formación profesional como Ingeniera Agrícola.*

*A mis profesores, aquellos que ponen en alto el nombre de la carrera, especialmente a mi asesor de tesis el Dr. Gustavo Mercado Mancera, por haberme acompañado y motivado en la realización de este trabajo, agradezco la paciencia y dedicación puesta hasta el día de hoy.*

*A los profesores que integraron el jurado al Mtro. Vicente Silva Carrillo, al Ing. Aurelio Valdéz López, al Dr. Gustavo Mercado Mancera, al Dr. Joob Anastacio Zaragoza Esparza y al Mtro. Rubén Vargas Márquez, gracias por su aportación y consejo para la mejora de este trabajo.*

*Al profesor Fernando Ortiz Salgado, por haberme permitido trabajar en el Laboratorio de Producción de Forrajes.*

*Finalmente, a la carrera de Ingeniería Agrícola y a mis compañeros y amigos, los cuales formaron parte de toda mi formación profesional, así como de su culminación.*

## **DEDICATORIA**

*A mi madre que es la persona más importante en mi vida, le dedico esta Tesis, siendo la educación la herencia más grande que me pudo dar, este es el fruto de tu sacrificio y amor que sembraste desde que fui niña, por eso y más estaré siempre agradecida, te amo mucho.*

*A mis hermanos: Sergio y Belén, gracias por siempre estar conmigo en los momentos más felices y en los difíciles que son los que nos han unido hasta el día de hoy, los amo demasiado.*

*A Dios que siempre ha estado conmigo, gracias por la vida que ha dado y por dejarme cumplir una meta más, que es la culminación de mi carrera profesional.*

*A mi familia, especialmente a mi abuelita Lupita y a mis padrinos Octavio y Andrea, gracias por el apoyo y su cariño incondicional.*

*A Rolando que siempre me ha motivado a seguir a adelante y a creer siempre en mí, gracias por formar parte de mi vida.*

*A todas las personas que formaron parte de mi estancia académica, gracias por haber hecho de esta etapa una de las más bellas de mi vida.*

*Salma Casarez López*

## CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>ii</i>
RESUMEN	<i>iii</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. Importancia económica del cultivo de avena forrajera	3
2.1.1. Estadísticas nacionales	3
2.2. Importancia de los estudios fenológicos de cultivos	6
2.3. Descripción fenológica del cultivo de avena forrajera	7
2.3.1. Fases y etapas fenológicas	11
2.4. Efecto de las condiciones ambientales en la fenología de cultivos	11
2.4.1. Factor climático	12
2.4.1.1. Acumulación de calor	13
2.4.1.2. Métodos de cálculo de acumulación de calor	13
2.4.2. Factor edáfico	14
2.5. Investigaciones previas del tema de estudio	15
2.6. Descripción del área de estudio	18
2.6.1. Localización geográfica	18
2.6.2. Características edafoclimáticas	19

	Página
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>20</b>
3.1. Metodología	20
3.1.1. Variables evaluadas	20
3.1.2. Análisis estadístico	21
3.2. Materiales	22
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>23</b>
4.1. Parámetro climático	23
4.2. Parámetro fenológico del cultivo	25
4.3. Acumulación de calor	31
4.4. Rendimiento	32
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>39</b>
<b>VI. LITERATURA CITADA</b>	<b>40</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>45</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Volumen de la producción nacional principales entidades (SIAP, 2018).	4
<b>Figura 2.</b> Volumen de la producción nacional 2010-2019 (SIAP, 2020).	4
<b>Figura 3.</b> Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de avena forrajera año agrícola 2020 (SIAP, 2020).	5
<b>Figura 4.</b> Producción vs rendimiento de avena forrajera año agrícola 2020 (SIAP, 2020).	5
<b>Figura 5.</b> Fenología de la avena (UC, 2012).	8
<b>Figura 6.</b> Localización del municipio de Cuautitlán Izcalli. México.	19
<b>Figura 7.</b> Tendencia de la temperatura máxima, media y mínima diaria, durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México	23
<b>Figura 8.</b> Ocurrencia de precipitación diaria durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.	24
<b>Figura 9.</b> ETP y precipitación diaria durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.	25
<b>Figura 10.</b> Altura de planta (cm) del cultivo de avena por unidad experimental (P), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	27
<b>Figura 11.</b> Altura promedio de planta (cm) del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	29
<b>Figura 12.</b> Longitud de hoja (cm) del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	31
<b>Figura 13.</b> Rendimiento en base húmeda de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	34
<b>Figura14.</b> Rendimiento en base seca de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	36

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Codificación BBCH de los estadios fenológicos de desarrollo de los cereales (Enz y Dachler, 1998).	9
<b>Tabla 2.</b> Fenología del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	26
<b>Tabla 3.</b> ANOVA de la altura de planta (cm) del cultivo de avena, por unidad experimental (P), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	27
<b>Tabla 4.</b> Prueba de Kruskal-Wallis de la altura de planta (cm) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	28
<b>Tabla 5.</b> ANOVA de longitud de la hoja del cultivo avena, por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.	29
<b>Tabla 6.</b> Prueba de Kruskal-Wallis de longitud de la hoja (cm) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	30
<b>Tabla 7.</b> Duración de las etapas fenológicas del cultivo de avena y acumulación de unidades calor (UC), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.	32
<b>Tabla 8.</b> ANOVA del rendimiento en base húmeda de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.	32
<b>Tabla 9.</b> Prueba de Kruskal-Wallis del rendimiento en base húmeda de forraje ( $t\ ha^{-1}$ ) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	33
<b>Tabla 10.</b> ANOVA del rendimiento en base seca de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.	34
<b>Tabla 11.</b> Prueba de Kruskal-Wallis del rendimiento en base seca de forraje ( $t\ ha^{-1}$ ) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	35
<b>Tabla 12.</b> Análisis químico proximal del forraje de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.	37

## RESUMEN

La avena forrajera tiene un gran potencial como alimento para ganado ya que se puede aprovechar toda la planta, y a través de su estudio fenológico se ayuda a mejorar la planificación de manejo en campo. El objetivo fue describir el comportamiento fenológico del cultivo de avena forrajera, variedad Turquesa, y la acumulación de calor, durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022, en Cuautitlán Izcalli, México. Las variables evaluadas fueron de carácter climático (temperatura y precipitación), fenológico (fases y duración de las etapas fenológicas del cultivo y altura de la planta); de rendimiento (peso en base húmeda y base seca, longitud y ancho de la hoja anterior a la hoja bandera) y se realizó su análisis químico proximal (AQP). El arreglo experimental fue completamente al azar con tres repeticiones, con un total de seis unidades experimentales. Los análisis de varianza correspondientes no reportaron diferencia estadística significativa en las variables de estudio. Se observó un mayor rendimiento en las unidades experimentales donde la distribución del riego fue más eficiente y con menor incidencia de malezas, con 17.52 y 6.29 ton ha<sup>-1</sup>, en base húmeda y seca, respectivamente. El cultivo tuvo un ciclo de 130 días y una acumulación de 1,336.6 unidades calor. El AQP presentó valores de proteína cruda de 6.81 y 7.24% en base húmeda y seca, respectivamente. Los resultados muestran como el deficiente manejo agronómico en campo y de la aplicación del riego, afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, lo que a su vez impacta de forma negativa el rendimiento. Se recomienda continuar evaluando la fenología de la avena, para establecer la mejor fecha de siembra con base a los requerimientos de calor que tiene ese cultivo.

## I. INTRODUCCIÓN

Con el paso de las estaciones se observan en los campos y montes una serie de cambios que tienen relación con la evolución del tiempo atmosférico a lo largo del año, así como con el carácter de este respecto al clima normal de un territorio; estos cambios afectan a la morfología y fisiología de plantas (Cara, 2006). El estudio del momento de los eventos biológicos periódicos (fenofases) en relación con el calendario ha sido denominado fenología (Matsoukis *et al.*, 2018).

Ésta varía mucho entre especies y gradientes geográficos, y es el resultado de la interacción de atributos inherentes a cada especie y su sensibilidad a factores externos, como la radiación (fotoperiodo), temperatura y precipitación. La evaluación de las fechas de las transiciones fenológicas ha jugado un papel importante para comprender los impulsores climáticos de la variabilidad interanual y para analizar cómo responde la vegetación a las condiciones climáticas (Bórnez, 2021). Con ayuda de los estudios fenológicos se maximiza el uso eficiente de los insumos disponibles, al permitir aplicarlos en dosis óptimas y en el momento en que los cultivos lo requieran (Vázquez *et al.*, 2008).

La avena es un cereal anual de cobertura, de rápido crecimiento y resistente al frío por lo que proporciona cortes tempranos. Es muy cultivado en países templados y subtropicales adaptándose a las condiciones tropicales de gran altitud (Suttle, 2003). Se utiliza como forraje en todo el mundo, por lo general, se siembra en otoño, se pasta antes de la elongación del tallo y se llevan a la madurez para su uso como alimento o granos para moler (Suttie y Reynolds, 2004).

En México este cultivo es un insumo clave para la producción de alimento balanceado de uso pecuario, lo que, aunado a su amplio rango de adaptación en diferentes zonas productoras, lo coloca como cultivo estratégico; el estado de Chihuahua es el principal productor de avena cultivada extensamente bajo condiciones de temporal y riego (Cibrián, 2017; SAGARPA, 2017).

En la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan se estableció el cultivo de avena forrajera bajo condiciones de riego, en el ciclo otoño-invierno, para alimentar el ganado que se encuentra en el Centro de Enseñanza Agropecuaria (CEA). La importancia de conocer el comportamiento fenológico de este cultivo a través de los años radica en poder mejorar las prácticas agronómicas y se generen mejores rendimientos de forraje, por lo cual se plantearon los siguientes objetivos e hipótesis.

### 1.1. Objetivo general

- Realizar el estudio fenológico del cultivo de avena forrajera en Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

#### 1.1.1. Objetivos particulares

- Describir el comportamiento fenológico del cultivo de avena forrajera durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022, en Cuautitlán Izcalli, México.
- Determinar los requerimientos de acumulación de calor del cultivo de avena forrajera, en condiciones de riego.
- Evaluar el rendimiento de la avena forrajera durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022 en las condiciones edafoclimáticas del área de estudio.

### 1.2. Hipótesis

- El comportamiento fenológico del cultivo de avena forrajera está determinado por las condiciones ambientales y manejo en campo.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Importancia económica del cultivo de avena forrajera

El cultivo de avena forrajera (*Avena sativa L.*) se emplea principalmente en la alimentación del ganado, en pastoreo, como heno o ensilado; se usa sola o en combinación con leguminosas forrajeras. La paja de avena está considerada como un muy buen alimento para el ganado. Este grano es un magnífico forraje en particular para caballos y mulas, así como para el ganado vacuno y ovino (Gobierno de México, s/f.).

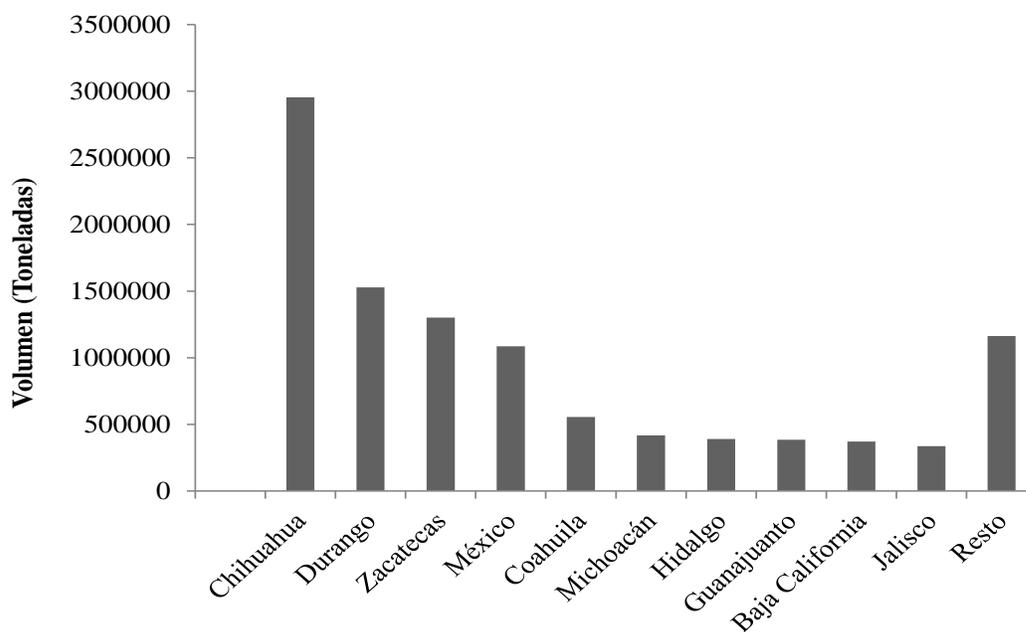
En México, la avena forrajera cumple un fundamental objetivo como forraje verde, ensilado, henificado o para producción de grano, el cual es un excelente proveedor de fibra soluble, proteína, ácidos grasos insaturados, vitaminas, minerales y fitoquímicos que reducen la presencia de varios tipos de enfermedades (Villazón *et al*, 2017).

Es el cereal forrajero que aporta mayores rendimientos en buenas condiciones hídricas, llegar a producir 11 t ha<sup>-1</sup> de materia seca de forraje las avenas de invierno, de ciclo largo y más productivas. El forraje es muy apetecible y de gran valor nutritivo, aunque de bajo contenido proteico. Las producciones de grano oscilan entre las 1-3 t ha<sup>-1</sup>. El valor nutricional del grano de avena es superior al de otros cereales, debido a su riqueza en aminoácidos esenciales como la lisina (UPNA, s/f).

El consumo nacional de avena forrajera en 2016 fue de 10.60 MMt, de las cuales México se abasteció con 98.83% de la producción nacional y con 1.17% de importaciones provenientes de Canadá y Estados Unidos (SAGARPA, 2017).

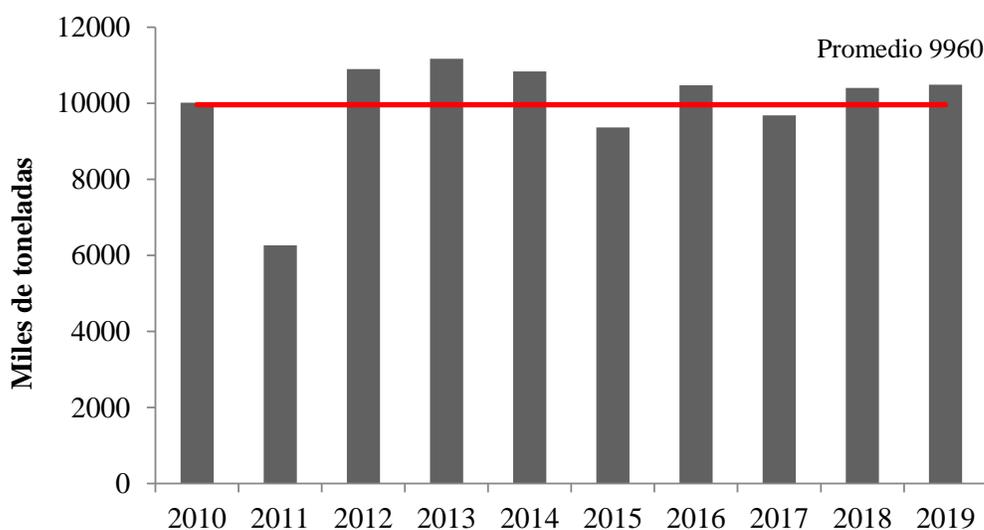
#### 2.1.1. Estadísticas nacionales

Este forraje es uno de los de mayor producción en México con poco más de 10 millones de toneladas y con una participación en la producción nacional de forrajes del 8.6%. Los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y México producen dos terceras partes de la producción nacional (SIAP, 2020). El campo chihuahuense aportó 28.2% a la producción nacional de avena forrajera, el ingreso por la venta de este grano fue de mil 493 millones de pesos (Figura 1).



**Figura 1. Volumen de la producción nacional principales entidades (SIAP, 2018).**

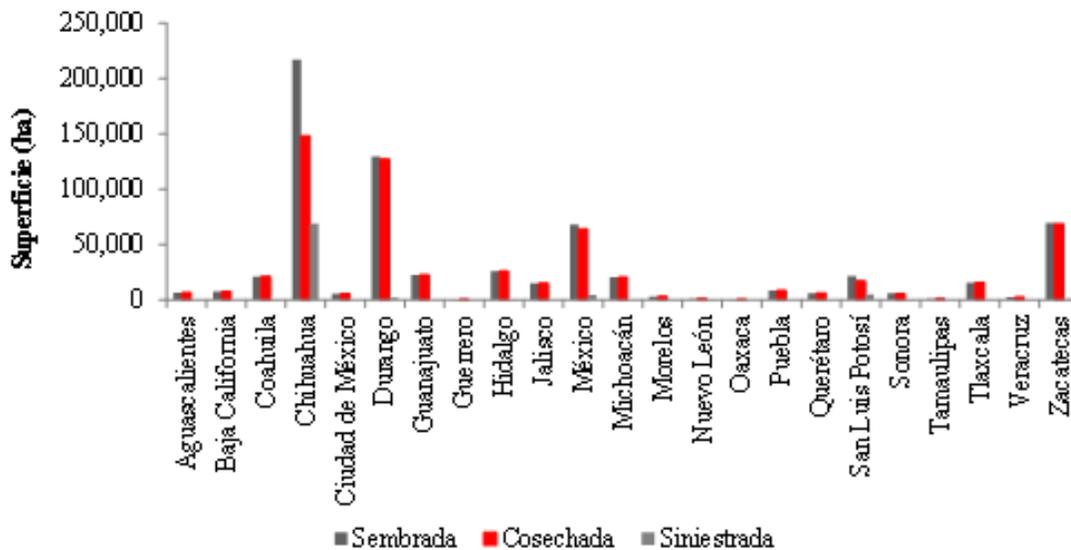
El promedio del volumen de la producción nacional en el 2019 fue de 9960 miles de toneladas siendo 1.0% mayor que el año anterior (Figura 2).



**Figura 2. Volumen de la producción nacional 2010-2019 (SIAP, 2020).**

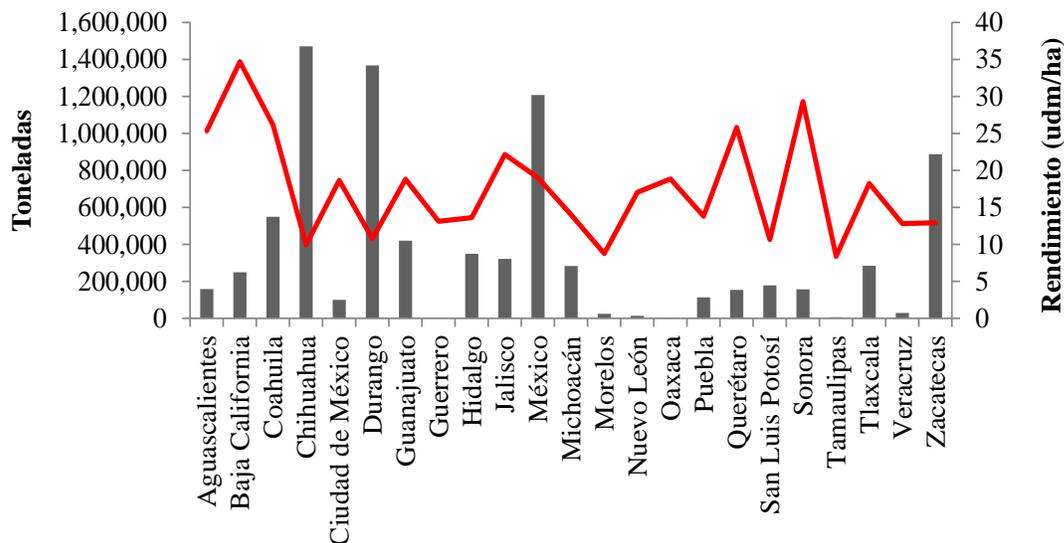
La superficie total sembrada, cosechada y siniestrada en el 2020 fue de 670,527; 588,905 y 81,622 hectáreas, respectivamente. Los estados de Chihuahua, Durango, México y

Zacatecas tienen una superficie sembrada de 216,961, 129,298, 67,905 y 69,357 ha respectivamente representando 72% de la superficie nacional (Figura 3).



**Figura 3. Superficie sembrada, cosechada y siniestrada de avena forrajera año agrícola 2020 (SIAP, 2020).**

Sin embargo, estos cuatro estados tienen bajos rendimientos respecto a otros con menor superficie sembrada como Baja California y Coahuila (Figura 4).



**Figura 4. Producción vs rendimiento de avena forrajera año agrícola 2020 (SIAP, 2020).**

## 2.2. Importancia de los estudios fenológicos de cultivos

Fenología, que se deriva de la palabra griega *phaino* que significa mostrar o aparecen, es el estudio de las etapas recurrentes del ciclo de vida de plantas y animales, especialmente su tiempo y relaciones con el tiempo y el clima (Schwartz, 2013).

El comité de fenología de los Estados Unidos de América en 1972 definió la fenología como: el estudio de la cronología de eventos biológicos recurrentes, las causas de su cronología con respecto a las fuerzas bióticas y abióticas y las interacciones entre fases de esta o diferente especie (Hudson y Keatley, 2010).

Se ha utilizado como indicador del clima y el tiempo a lo largo de la historia humana particularmente en relación con la agricultura, pero sólo dentro de los dos últimos siglos ha emergido como una ciencia por derecho propio (Schwartz, 2013).

Los estudios fenológicos permiten entender las respuestas de los organismos a los factores ambientales, así como las etapas críticas de las plantas cultivadas, lo cual ayuda a maximizar el uso eficiente de los insumos disponibles, al permitir aplicarlos en dosis óptimas y en el momento en que las plantas lo requieran (Vázquez *et al.*, 2008).

Como una rama de la Agrometeorología, las observaciones agrometeorológicas incluyen las observaciones de la planta y de su medio ambiente físico en forma conjunta. Estas son importantes porque permiten determinar los requerimientos bioclimáticos de los cultivos, calendarios agrícolas, zonificaciones agroclimáticas y herramientas para una planificación de la actividad agrícola (Yzarra y López, 2011).

Además, son importantes para el desarrollo de los planes de conservación porque permite el desarrollo de calendarios de recolección de germoplasma tanto *in situ* como *ex situ*. La fenología también contribuye al desarrollo de planes de manejo de ecosistemas y agroecosistemas, que aseguran la disponibilidad continua de recursos para los polinizadores, manteniendo así la polinización servicios ecosistémicos, y que hacen posible el desarrollo sostenible de la cosecha de productos forestales no maderables, entre otros beneficios (Ramírez *et al.*, 2021).

Muchos países han desarrollado y mantienen redes de observación fenológica, dependiente en su mayor parte de los servicios meteorológicos. Agricultores, ganaderos, forestales, viveristas, floricultores, horticultores, entre otros, pueden contribuir como observadores fenológicos, informando sobre algunas o varias especies o cultivos comunes en su zona (Martínez, 2017).

Los informes fenológicos pueden referirse a periodos que pueden abarcar un año, seis meses, una semana, o ser de interés inmediato. Los servicios de Inglaterra, Irlanda y Francia tienen observadores que en cuanto notan la aparición de alguna plaga o enfermedad avisan inmediatamente a la oficina central, la que se encarga de comunicar a los agricultores para que tomen las medidas necesarias, contribuyendo la base de los servicios de alarma contra insectos y enfermedades criptogámicas (Martínez,2017).

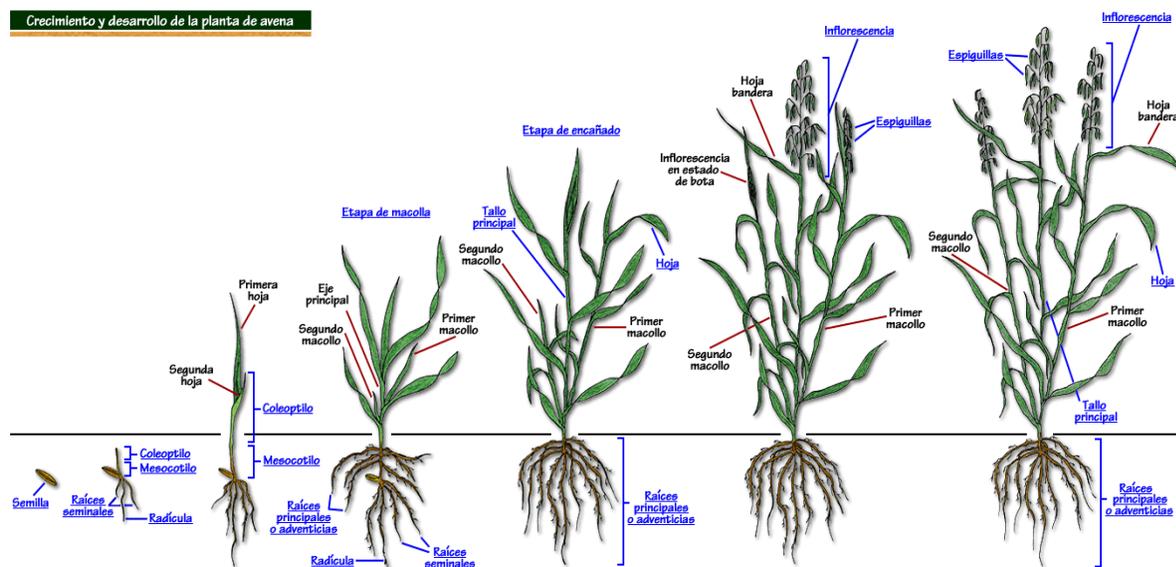
### 2.3. Descripción fenológica del cultivo de avena forrajera

La planta de avena completa su ciclo de vida desde siembra-germinación a cosecha-madurez fisiológica en seis meses, lo cual depende del ambiente y cultivar. Como las demás gramíneas, la avena es una colección de brotes, o macollos que surgen de una sola copa (Sonego, 2000).

El ciclo se divide en cuatro etapas: etapa de germinación, vegetativa, reproductiva y de fructificación-madurez. Cada una de estas etapas se puede distinguir de las demás por sus características morfológicas y por los eventos de desarrollo que ocurren en ella (Bonnett, 1961)

La etapa vegetativa comienza a partir del estado de segunda hoja, el crecimiento de macollos desde yemas ubicadas en los subnodos del eje principal. Los macollos corresponden a brotes laterales y su desarrollo sigue el mismo modelo del tallo principal; así, un macollo va emitiendo hojas y produciendo raíces adventicias durante su desarrollo vegetativo. Las plantas pueden llegar a producir entre tres y cuatro macollos, siendo común que uno o dos de los macollos de formación más tardía no logren aportar al rendimiento (Figura 5) (UC, 2012).

Hay una etapa de transición que es de corta duración y difícil de identificar que las otras etapas en la avena, ya que consiste solo en un ligero alargamiento del ápice del brote que precede a la iniciación de la panícula. Durante la etapa reproductiva, la panícula y sus partes se diferencian y desarrollan, y los entrenudos del tallo se alargan. La etapa de fructificación comienza con la fecundación y termina con la maduración de la semilla. Cada etapa es terminal en el sentido de que los tipos de partes iniciadas en una etapa determinada no se inician en una etapa posterior (Bonnett, 1961).



**Figura 5. Fenología de la avena (UC, 2012).**

### 2.3.1. Fases y etapas fenológicas

La escala BBCH (sistema de codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para todas las especies de plantas mono y dicotiledóneas), es ampliamente utilizada para la descripción de las etapas de desarrollo del crecimiento de varios cultivos, en la Tabla 1 se muestra la codificación fenológica de los cereales (*Avena sativa* L., *Hordeum vulgare* L., *Triticum spec.* L., *Secale cereale* L.), a la cual se le asigna un número del cero al nueve, de germinación hasta senescencia.

**Tabla 1. Codificación BBCH de los estadios fenológicos de desarrollo de los cereales (Enz y Dachler, 1998).**

Código	Descripción
Estadio principal 0. Germinación	
0	Semilla seca
1	Comienza la imbibición de la semilla
2	Imbibición completa de la semilla
3	Radícula (raíz embrional) emergida de la semilla
5	Radícula alargada, formando pelos radiculares y raíces secundarias
7	Coleóptilo, emergido de la semilla
9	Emergencia: el coleóptilo traspasa la superficie del suelo.
Estadio principal 1. Desarrollo de las hojas (tallo principal)	
10	1a hoja, atraviesa el coleóptilo
11	1a hoja, desplegada
12	2 hojas, desplegadas
13	3 hojas, desplegadas
1	Los estadios continúan hasta
19	9 o más hojas, desplegadas
Estadio principal 2. Formación de brotes laterales (macollaje)	
20	No hijuelo visible
21	Comienzo del macollamiento; 1 hijuelo visible
22	2 hijuelos o macollas visibles
23	3 hijuelos o macollas visibles
2	Los estadios continúan hasta ...
29	Fin del macollamiento; el máximo de hijuelos o macollas
Estadio principal 3. Encañado	
30	Comienzo del encañado: pseudotallo e hijuelos, erectos; el primer entrenudo, comienza a alargarse; el extremo de la inflorescencia, 1 cm por encima del nudo del ahijamiento.
31	1er nudo, por lo menos a 1 cm por encima del nudo del macollaje.
32	2o nudo: perceptible, a 2 cm del 1er nudo
33	3er nudo: perceptible, a 2 cm del 2o nudo
3	Los estadios continúan hasta ...
37	Aparece la última hoja (hoja bandera), aún enrollada
39	Estadio hoja bandera: hoja bandera completamente desenrollada, lígula recién visible
Estadio principal 4. Hinchamiento de las panículas o espigas (Embuchamiento)	
41	Estadio hinchado temprano: se alarga la vaina de la hoja bandera
43	Estadio hinchado medio: se empieza a ver la vaina de la hoja bandera, hinchada.
45	Estadio hinchado tardío: la vaina de la hoja bandera está hinchada
47	Se empieza a abrir la vaina de la hoja bandera
49	Primeras aristas (barbas), visibles (sólo en variedades aristadas)
Estadio principal 5. Salida de las espigas o panículas (Espigado)	

## Continuación Tabla 1.

Código	Descripción
51	Comienzo del espigado: la punta de la espiga o de la panícula emegen de la vaina; 1 espiguilla recién visible
52	20 % de la espiga emergida
53	30 % de la espiga emergida
54	40 % de la espiga emergida
55	Mitad del espigado: emergida la mitad de la espiga o panícula.
56	60 % de la espiga emergida
57	70 % de la espiga o panícula emergida
58	80 % de la espiga emergida
59	Fin del espigado: la espiga o panícula completamente fuera.
Estadio principal 6. Floración (tallo principal)	
61	Comienzo de la floración: primeras anteras visibles
65	Plena floración: 50 % de las anteras maduras
69	Fin de la floración: todas las espiguillas han terminado la floración, pero todavía pueden permanecer algunas anteras deshidratadas.
Estadio principal 7. Formación del fruto	
71	Estadio de madurez acuosa: los primeros granos han alcanzado la mitad de su tamaño final
73	Grano lechoso temprano
75	Grano lechoso medio: contenido del grano lechoso, granos, de tamaño final, verdes todavía.
77	Grano lechoso tardío
Estadio principal 8. Maduración de frutos y semillas	
83	Pastoso temprano
85	Pastoso blando: contenido del grano, blando, pero seco; no se mantiene la huella de la uña del dedo
87	Pastoso duro: contenido del grano, sólido; se mantiene la huella de la uña del dedo.
89	Madurez completa: grano duro, difícil de dividir con la uña del pulgar
Estadio principal 9. Senescencia	
92	Sobre-madurez: granos, muy duros, no pueden ser mellados con la uña del pulgar
93	Granos, desprendiéndose durante el día
97	Planta muerta, tallos se quiebran
99	Producto cosechado

#### 2.4. Efecto de las condiciones ambientales en la fenología de cultivos

Hay muy pocas regiones en el planeta donde las condiciones ambientales sean continuamente favorables para todas las funciones de las plantas, lo que sí es frecuente es que a lo largo del año se produzcan cambios estacionales en el clima y por lo mismo en la disponibilidad de recursos, lo que obliga a las plantas a crear mecanismos de cambio estacional en morfología y fisiología para poder sobrevivir. Estos cambios fenológicos ocurren cuando la planta los requiere para enfrentar una situación de estrés para activar su crecimiento (Vázquez, 1992).

La repetición sincronizada con el clima de los eventos fenológicos, tales como floración, fructificación, es frecuentemente utilizada para definir las secuencias estacionales (Alvarado *et al.*, 2002). Esta estacionalidad se refiere tanto a los cambios regulares que se presentan en el ambiente, como a las respuestas biológicas condicionadas por esos cambios en el ambiente, de tal forma que podemos entender las estaciones como un integrador natural.

Cada planta presenta límites mínimos, óptimos y máximos; algunas son susceptibles a las temperaturas altas en las primeras fases fenológicas y posteriormente pueden resistir altas temperaturas, otras suspenden funciones al estar en condiciones de bajas temperaturas. Igualmente, la oportuna cantidad de agua es vital; una precipitación excesiva en las primeras fases de vida es perjudicial por afectar los retoños, si está acompañada de granizo y se presenta durante la floración y fructificación causará bajas en la producción (Granados y Sarabia, 2013).

Es posible identificar diferentes grupos funcionales de plantas que responden de manera similar a los cambios ambientales, aunque presentan diferencias con otros grupos, de tal manera que podemos encontrar especies cuya floración u otra fenofase está controlada por la temperatura, otras plantas donde el fotoperiodo es determinante, e incluso algunas especies donde la disponibilidad de agua sea el factor que desencadene un determinado evento fenológico (Alvarado *et al.*, 2002).

#### 2.4.1. Factor climático

El clima es uno de los principales factores que regulan la distribución de las especies de plantas, ya sea directamente, a través de limitaciones fisiológicas en el crecimiento y la reproducción o, indirectamente, por medio de los factores ecológicos, como la competencia por recursos (Jarma *et al*, 2012).

El principal factor climático que afecta la fenología de las plantas es la temperatura y se sabe que incrementos en la temperatura del aire pueden ser detectados fácilmente en los datos fenológicos (Alvarado *et al.*, 2002).

En general, el desarrollo de la planta es más rápido dentro de un rango específico de temperaturas óptimas y disminuye a medida que aumenta la desviación de este rango de temperaturas óptimas. El aumento de la temperatura media ha provocado un acortamiento de las fases de desarrollo de los cultivos anuales con efectos en los rendimientos de los cultivos, porque un acortamiento de la temporada de crecimiento da como resultado una menor absorción de radiación y, por lo tanto, menos biomasa y rendimiento (Siebert y Ewert, 2012).

La productividad de las plantas depende también de la cantidad disponible de agua y de la eficiencia del organismo en el uso de ella. Las condiciones de sequía o potenciales hídricos bajos en el ambiente de una planta proporcionan una fuerza conducente a la pérdida de agua. Ésta puede limitar el crecimiento y la productividad de plantas mesófitas, debido a periodos secos inesperados o a una situación de lluvia baja, lo que hace necesario el riego adicional (Yepes y Silveira, 2011).

Los principales efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento está la reducción en la altura, tallo, raíces, área foliar, peso foliar específico y biomasa de la planta. Asimismo, la eficiencia de uso de agua en la productividad también es alterada debido a los cambios en la biomasa total y en la evapotranspiración (Luna *et al*, 2012).

#### 2.4.1.1. Acumulación de calor

En la agricultura la combinación del tiempo y la temperatura resulta en el denominado tiempo térmico (TT) o también conocido como suma de calor, grados día, grados día de desarrollo o tiempo fisiológico (Cháves *et al.*, 2011).

Los grados días de desarrollo (GDD) proporcionan una estimación de la energía térmica acumulada disponible para el desarrollo de un cultivo. El uso de los GDD permite medir los requerimientos de calor asociados a las etapas fenológicas del cultivo, lo que a su vez permite predecir cuándo ocurrirá una determinada etapa de la planta conociendo las temperaturas diarias (León *et al.*, 2019).

Las unidades calor (UC) expresan matemáticamente la acumulación de temperatura arriba de una temperatura crítica de un organismo dado, lo cual se traduce en desarrollo. La mayoría de las plantas tienen valores fijos ya determinados de UC para cada etapa fenológica, esta información permite estimar su fecha aproximada de madurez fisiológica contribuyendo a una cosecha óptima (INIFAP, s/f).

#### 2.4.1.2. Métodos de cálculo de acumulación de calor

El cálculo del tiempo térmico puede llevarse a cabo a través de varios métodos; no obstante, los dos métodos más comunes son el método simple y el método residual:

- Método simple: En este método se calcula la  $T_i$  a partir de las temperaturas máximas y mínimas del día y, posteriormente, se le resta la  $T_b$  (Cháves *et al.*, 2011).

$$T_i = \frac{(T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})}{2}; TT = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$$

En donde  $TT$  es el tiempo térmico expresado en GDD,  $n$  es el número de días,  $T_i$  la temperatura media y  $T_b$  la temperatura base.

- Método residual: La metodología es similar al método simple; sin embargo, incluye algunas restricciones, las cuales plantean que cuando las temperaturas máximas y mínimas

están por encima o por debajo de la  $T_m$  (temperatura máxima de desarrollo) y  $T_b$ , respectivamente, se deben utilizar la  $T_m$  y  $T_b$  para el cálculo de la temperatura media ( $T_i$ ).

Posteriormente, a esta  $T_i$  se le debe restar la temperatura base.

$$T_i = \frac{(T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n})}{2}$$

Con las siguientes consideraciones: Si  $T_{m\acute{i}n} < T_b$ , se asume el valor de  $T_b$ ; si  $T_{m\acute{a}x} > T_m$ , se asume el valor de  $T_m$ ; y si  $T_{m\acute{i}n} < T_b$  y  $T_{m\acute{a}x} > T_m$ , se asumen los valores de  $T_b$  y  $T_m$ .

#### 2.4.2. Factor edáfico

El factor suelo se asocia principalmente, a la fuerza con que el agua es retenida por el suelo a medida que se seca. Esta fuerza de retención aumenta a medida que el suelo pierde agua afectando la capacidad de absorción por parte de las plantas. Los distintos grados de disponibilidad de agua en el suelo están definidos por sus constantes hidrológicas: capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y agua higroscópica (Murphy y Hurtado, 2011). Los elementos de balance hidrológico que posibilitan el conocimiento de las deficiencias, el agua útil y los excesos, pueden marcar los límites de crecimiento y condiciones más favorables para un determinado cultivo (Martínez, 2017).

Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente en respuesta a un ambiente escaso en agua, en donde la tasa de transpiración excede a la toma de agua, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Moreno, 2009).

Los suelos proporcionan los nutrientes esenciales, el agua, el oxígeno y el sostén para las raíces que nuestras plantas destinadas a la producción de alimentos necesitan para crecer y florecer. Además, cumplen una función de amortiguación al proteger las delicadas raíces de las plantas de las fluctuaciones de temperatura (FAO, 2015).

En lugares con suelos fértiles, la mayoría de las especies producen frutos una o dos veces al año, mientras que en suelos poco fértiles son supra-anales y anuales, ya que la fertilidad del suelo y la irradiación limitan la producción de frutos. Por lo tanto, se puede concluir que los

patrones de producción de flores y frutos son el resultado de la interacción entre variables genéticas, fisiológicas y climáticas (Flórez, 2018).

Como las particularidades del suelo y su formación misma en gran parte es función del clima, es evidente que la distribución geográfica de las plantas y su desarrollo, dependen tanto del suelo como de los factores meteorológicos, en última instancia depende del clima (Martínez, 2017).

## 2.5. Investigaciones previas del tema de estudio

Hjelkrem *et al.* (2017) diseñaron un modelo predictivo para el desarrollo fenológico del crecimiento de las plantas, *Oat Phenological Model 1*, basándose en la función de crecimiento sigmoideo Gompertz de la acumulación de grados-día desde la siembra, con una temperatura base del aire de 0 °C. La tasa de desarrollo es una función sigmoidea, simple y asimétrica, tiene ventaja en comparación con la curva logística simétrica, ya que el crecimiento no siempre es simétrico respecto al punto de inflexión. El modelo final para el desarrollo fenológico en avena incluyó solo un factor climático, la temperatura del aire. La temperatura base utilizada en la acumulación de grados-día fue igual a 0 y 5 °C ya que se utiliza comúnmente para los cálculos del desarrollo fenológico en la avena.

Bleken y Skjelvag (1986), sometieron seis cultivares de avena a diferentes horas de fotoperíodo, durante la maduración se produjo un cambio en la respuesta al fotoperíodo, con días más largos retardando el desarrollo de la madurez en verde a madurez amarilla. Un resultado de esto fue el período más largo de panícula a madurez amarilla a las 16 horas fotoperíodo tanto a las 12 como a las 24 horas. Además, se produjo un cambio gradual en la respuesta durante la maduración, los días más cortos aumentaron la tasa de desarrollo.

Los aumentos de temperatura dan como resultado una fenología alterada del desarrollo de las hojas, la floración, la cosecha y la producción de frutos, una disminución del período de vernalización y una asincronía entre la floración y los polinizadores. Además, el aumento de las temperaturas da como resultado tasas de respiración más altas, períodos de formación de

semillas más cortos y menor producción de biomasa, por lo tanto, rendimientos más bajos (Korres, 2016).

Espitia *et al.* (2012), mencionaron que la producción de materia seca total a través de las etapas fenológicas en avena va en aumento hasta grano lechoso, en la acumulación de materia seca por día y cantidad de proteína por hectárea los menores valores corresponden a la etapa de embuche. La mejor etapa fenológica de corte para maximizar cantidad de forraje son los estados lechoso y masoso del grano, donde se alcanzan producciones de hasta 19 t ha<sup>-1</sup> de materia seca; sin embargo, si el propósito es calidad, la mejor etapa de corte es embuche, ya que se obtiene hasta 24% de proteína. El rendimiento y calidad de avena forrajera se encuentran altamente influenciados por la interacción genotipo-ambiente, no solamente en el espacio también a través del tiempo.

Peltonen y Rajala (2007) reportaron en su estudio de duración de las fases de desarrollo vegetativo y generativo de avena que cuanto más larga fue la fase de preantesis, más larga fue también la fase generativa pero no la fase vegetativa. Con respecto a sus asociaciones con las subfases componentes, no se registró una sola fase dominante que contribuyera a la duración de la fase previa a la antesis. Más bien, muchas de las subfases parecían contribuir solo modestamente a la duración de la fase previa a la antesis. La prolongación de la fase vegetativa se produjo a expensas de otras fases de desarrollo, ya que se correlacionó positivamente con la relación entre el tiempo vegetativo y el de crecimiento. El período vegetativo más largo resultó en un mayor número total de hojas, mientras que no se observó ningún otro efecto consistente sobre el crecimiento de hojas y tallos, el alargamiento del ápice y tallo y los componentes de rendimiento. La prolongación de la fase previa a la antesis generativa ocurrió más claramente a expensas del período de llenado de grano, ya que se correlacionó con la relación entre la fase generativa y el período de llenado de grano. La fase de preantesis generativa varió unos 33 grados día, pero también las subfases mucho más cortas, las fases prefértil y preaborto fértil que variaron más entre las entradas de avena, lo hicieron entre 33 y 39 grados día.

Gondal *et al.* (2020), estudiaron dos cultivares de avena (Sgd-oat-2011 y cultivar No-75525) usando tres diferentes métodos de siembra (camellones, surcos y voleo). Se evaluó el efecto

interactivo para optimizar el forraje producción y ahorro de agua de riego. Se observaron diferencias significativas para días a emergencia y 50% de floración. La emergencia de Sgd-oat-2011 y No -75525 ocurrió después de 9 y 7.8 días de la siembra, respectivamente bajo siembra en camellones, seguida de siembra en surcos a los 10 y 8.8 días; al voleo la emergencia fue a los 11.6 y 10.4 días. Se observó un 50% de floración en ambos cultivares, después de 116.8 y 98.2 días de siembra, respectivamente, bajo siembra en camellones seguida de la siembra en surcos con 113.6 y 93.0 días, respectivamente. En siembra en voleo se requirió el menor número de días para la floración, 109.6 y 88.4 días, esto se debió principalmente al aumento en competencia intra-planta y hacinamiento entre plantas vecinas.

Se concluyó que el Cultivar No-75525 requirió un número mínimo de días a la emergencia cuando se sembró en camellones; el máximo número de días a la floración se observó para el cultivar Sgd-oat-2011 bajo el mismo método de siembra. La siembra en camellones es el mejor método con respecto al desarrollo fonológico, pues mejoró los parámetros de crecimiento como el número de macollos  $m^{-2}$ , altura de la planta, número de hojas por macollo, diámetro del tallo. Teniendo en cuenta el ahorro de agua de riego, el menor tiempo de riego se registró para la siembra en camellones ya que hubo que remojar menos la superficie.

Por su parte, López (2016) evaluó la respuesta de la aplicación de lixiviados de lombricomposta en el cultivo de avena, en Cuautitlán Izcalli, México, en el cual reportó un total de 1,185.4 unidades calor acumuladas, un rendimiento de materia en base húmeda promedio en los tratamientos con aplicación de fertilizante químico y lixiviado (MV) de 73.79 y 91.03 Mg  $ha^{-1}$  respectivamente y de producción de materia en base seca (MS) de 16.31 y 20.21 Mg  $ha^{-1}$ . También reportó altura de planta de un rango de 90 a 100 cm como valores máximos.

Santos *et al.* (2017) verificaron la expresión de descriptores morfológicos y fenológicos en avena respecto a la interacción genotipo-ambiente. La variación ambiental se dio mediante la siembra en dos fechas, creando diferentes condiciones de temperatura y precipitación: otoño-invierno (O-I) e invierno-primavera (I-P). En la temporada de crecimiento I-P, se registraron temperaturas promedio más altas del aire y del suelo y menor precipitación que

en la temporada de crecimiento O-I. La producción de cultivos en la estación de crecimiento O-I permitió que los genotipos cumplieran con los criterios de diferenciación, homogeneidad y estabilidad. Por el contrario, la producción de cultivos en la temporada de crecimiento I-P provocó que los genotipos acortaran sus fases fenológicas.

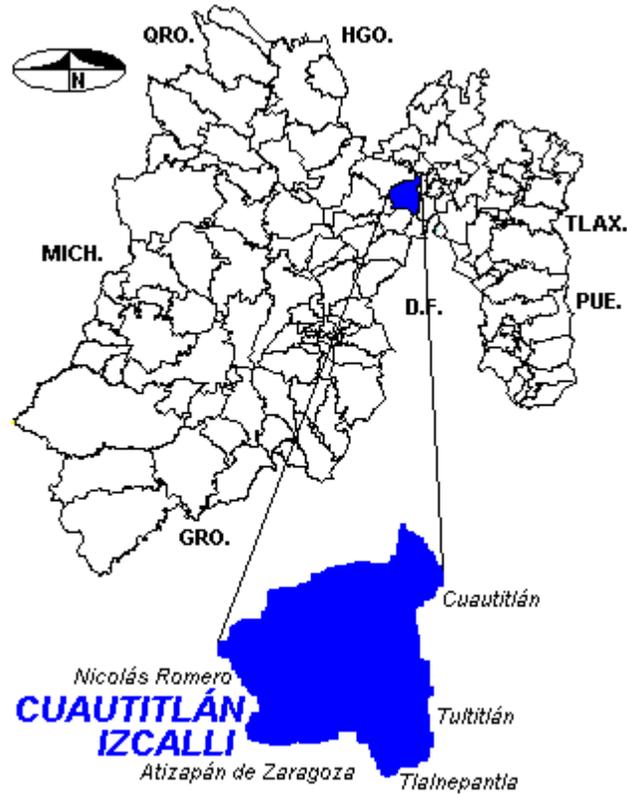
En la temporada de crecimiento O-I, el ciclo del cultivo desde la emergencia hasta la maduración fue de 113 días en promedio, sin embargo, en el crecimiento I-P el ciclo completo fue 25 días más corto, y además la altura final de la planta disminuyó 10 cm. Las plantas de avena suelen preferir los días largos y, por lo tanto, las noches cortas, lo que favorece la floración temprana. Estas condiciones estuvieron presentes en la estación de crecimiento I-P. En consecuencia, los cultivares sembrados en otoño tienden a tener ciclos de cultivo más largos que los cultivados en primavera.

## 2.6. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM (FES-C), en el centro del Valle donde se ubican los municipios de Cuautitlán México y Cuautitlán Izcalli, Estado de México, pertenece políticamente al último municipio.

### 2.6.1. Localización geográfica

El municipio de Cuautitlán Izcalli se localiza en la parte noroeste de la cuenca de México. Tiene una extensión territorial de 109.9 km<sup>2</sup> que representa el 0.5% de la superficie del Estado de México, con una altitud de 2,256 msnm, el municipio de Cuautitlán Izcalli, se encuentra ubicado dentro del eje Neovolcánico, con las elevaciones al Suroeste y Oeste del municipio, que forman parte de las estribaciones de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, y colinda al Norte con los municipios de Tepetzotlán y Cuautitlán México, al Este con Cuautitlán México y Tultitlán, al Sur con Tlalnepantla de Baz y Atizapán de Zaragoza, al Oeste con Villa Nicolás Romero y Tepetzotlán (Figura 6).



**Figura 6. Localización del municipio de Cuautitlán Izcalli. México.**

### 2.6.2. Características edafoclimáticas

El clima del área de estudio es Templado subhúmedo con lluvias de verano, el más seco de los subhúmedos, con verano fresco, sin sequía intraestival, el mes más caliente es junio, con poca oscilación térmica; con una temperatura media anual de 15.4 °C; 652.1 mm de precipitación promedio anual; con un período de bajo riesgo de helada de 213 días. El total de días con helada al año es de 26 días (Angeles, 2022). Los suelos en general se clasifican como Vertisol, el suelo es de color gris, pH de 7.0 (Mercado *et al.*, 2013).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Metodología

Se utilizó la variedad Turquesa de avena forrajera (Anexo 1), la cual fue sembrada de forma mecanizada el 15 de diciembre de 2021 y cosechada de forma manual el 25 de abril de 2022 (131 días de ciclo de cultivo). Al cultivo se le aplicaron 4 riegos (siembra y tres de auxilio).

Se trabajó en dos melgas de la parcela 25 del CEA de la FES-C, las cuales tuvieron las siguientes dimensiones: 1,400 y 1,445 m<sup>2</sup>.

Las observaciones se realizaron en unidades de 1 m<sup>2</sup> bajo un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones en las dos melgas, con un total de seis unidades experimentales (UE).

Dentro de cada una de ellas se establecieron tres cuadrantes de 1 m<sup>2</sup>, de forma aleatoria, en donde se llevaron a cabo las observaciones. En el cuadrante o repetición, se tomó el dato de la altura en 10 plantas en forma aleatoria, para tener un total de 30 plantas por melga. Se buscó que las plantas seleccionadas tuvieran competencia completa.

En el Anexo 2 se muestran imágenes de esta etapa del trabajo de campo.

##### 3.1.1. Variables evaluadas

Las variables consideradas en este estudio fueron las siguientes:

- **Parámetro climático:** se tomaron los datos a nivel diario de temperatura y precipitación, reportados por la estación meteorológica de la Facultad. Estos datos se relacionaron con el crecimiento y desarrollo del cultivo de avena evaluada en este trabajo.

- **Parámetro fenológico del cultivo:** una vez que el cultivo emergió (a los 27 días después de la siembra -DDS-), se consideraron las fases fenológicas de emergencia, floración y cosecha; y la duración de las etapas fenológicas: germinación, etapa vegetativa y etapa reproductiva. Asimismo, se determinó la acumulación de calor (Unidades Calor) en cada etapa, a través del Método Residual ( $UC = \text{temperatura media} - \text{temperatura base}$ ); se

consideró 5 °C como temperatura base. También se tomaron datos de altura de planta cada 15 días después de la emergencia (DDE).

✓ Longitud y ancho de hoja: al momento de la cosecha se tomaron 10 tallos al azar de cada repetición, con un total de 30 tallos por melga, de los cuales se tomó la hoja anterior a la hoja bandera.

- Rendimiento: al momento de la cosecha se determinó el peso en base húmeda de la toda la parcela útil (1 m<sup>2</sup>) en cada repetición (seis unidades en total); se tomó una muestra de cada repetición de 500 g de forraje en base húmeda para secarse en una estufa hasta alcanzar peso constante y determinar el peso en base seca por unidad de superficie cosechada. Los datos de forraje en base húmeda y base seca fueron extrapolados a toneladas por hectárea (ton ha<sup>-1</sup>).

- Análisis químico proximal: de la muestra de forraje ya secado, se tomó una muestra de un kilogramo para realizar el análisis químico proximal (AQP); este análisis se realizó en el Laboratorio de Bromatología de la FES Cuautitlán. Se determinó: materia seca, humedad total, extracto etéreo, cenizas, proteína cruda, fibra cruda y extracto libre de nitrógeno.

### 3.1.2. Análisis estadístico

Se realizaron los análisis de varianza correspondientes a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ . Los procedimientos se realizaron con el software Statgraphics® (Statgraphics Inc., USA). Se compararon los valores medios y se determinó el valor de P a  $\alpha = 0.05$ , para realizar la prueba de hipótesis siguiente:

H nula: Las medias de las observaciones no difieren.

H alterna: Las medias de las observaciones son significativamente distintas.

Sí el valor de P es menor de P a  $\alpha = 0.05$ , entonces se rechaza la hipótesis nula, y viceversa, se acepta.

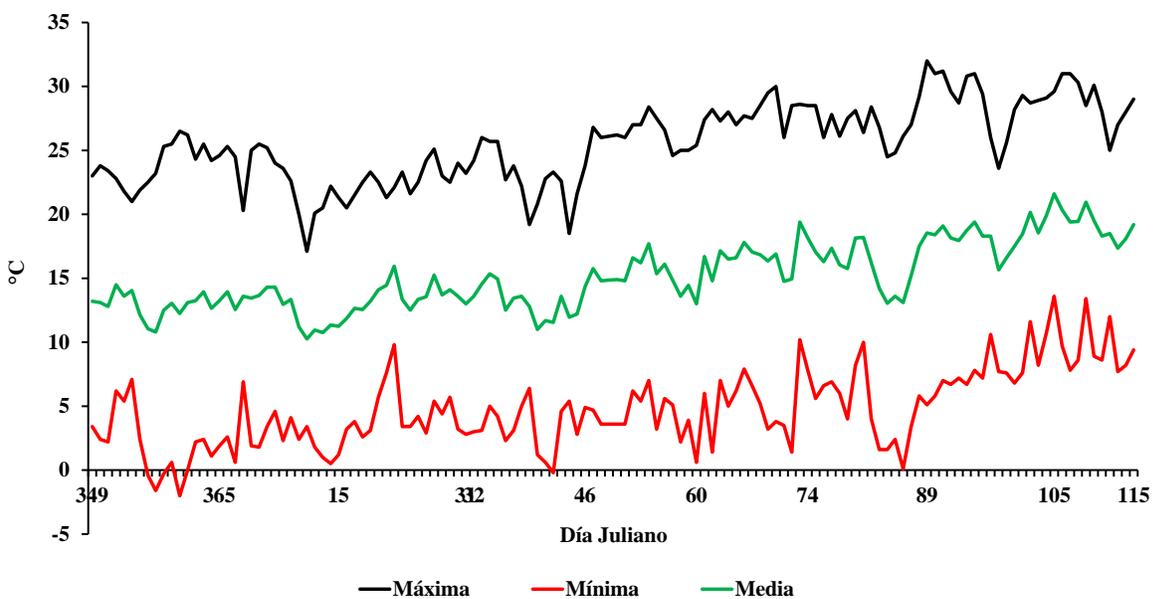
### 3.2. Materiales

- Semilla certificada de avena forrajera, variedad Turquesa (Anexo 5).
- Regla de 1 m de largo.
- Libreta de campo, pluma.
- Báscula.
- Estufa de secado.
- Bolsas de papel, entre otros.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Parámetro climático

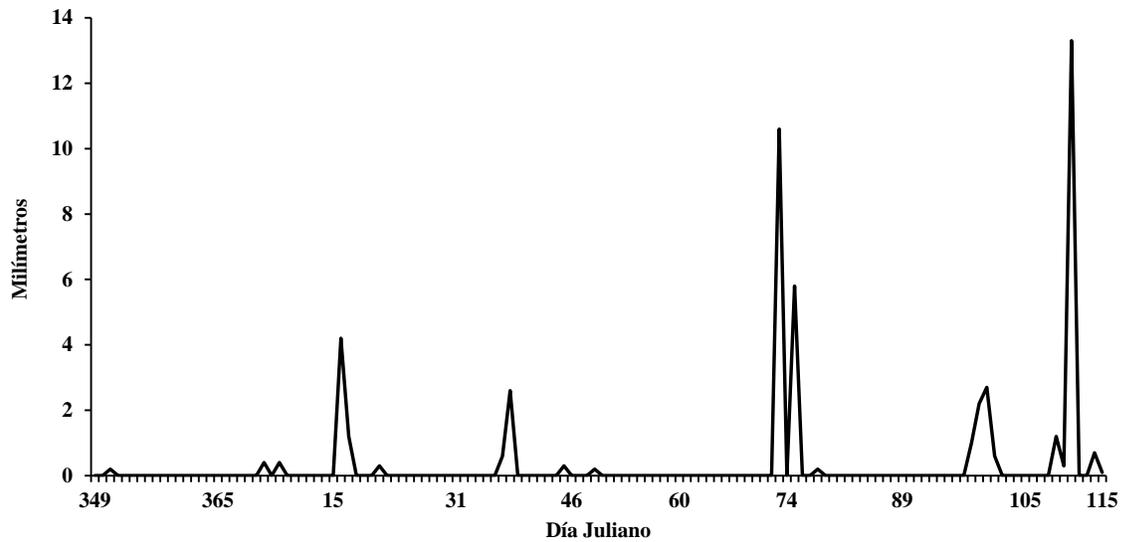
• Temperatura ambiental. En la Figura 7 se presentan los datos de temperatura máxima, media y mínima diaria durante el ciclo de cultivo de avena. Se observa que la presencia de heladas no fue significativa en esta temporada, se presentaron antes de la emergencia del cultivo (12 de enero) y posteriormente sólo una, el 11 de febrero, que registró  $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y que no afectó al cultivo.



**Figura 7. Tendencia de la temperatura máxima, media y mínima diaria, durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.**

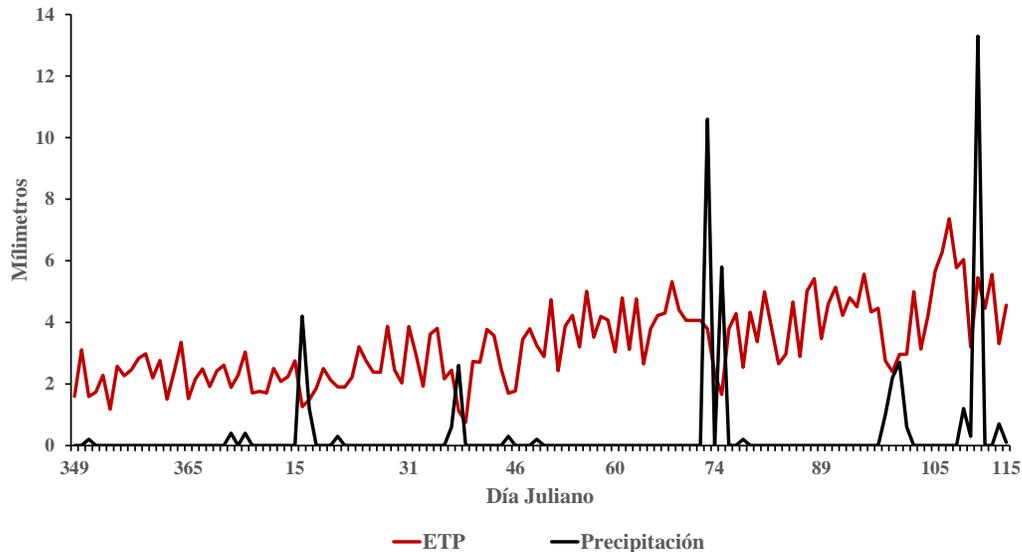
El cultivo de avena en el ciclo otoño-invierno (O-I) se desarrolló en condiciones de cielo mayormente despejado lo que permitió observar que la temperatura máxima diaria oscilara entre los 20 y 25  $^{\circ}\text{C}$ , y para finales del ciclo del cultivo esta llegó a presentar valores cercanos a los 30  $^{\circ}\text{C}$ , por lo que el abasto de agua se hace muy necesario para disminuir la pérdida por evapotranspiración.

- Precipitación. En el área de estudio la precipitación es baja durante esta época y los cultivos agrícolas se abastecen con agua de riego, durante todo su ciclo biológico. Para el ciclo O-I 2021-2022 el cultivo fue abastecido de 4 riegos, espaciados entre 28 y 35 días cada uno. Además, se presentaron algunas precipitaciones pero que no fueron suficientes para abastecer las necesidades hídricas del cultivo (Figura 8).



**Figura 8. Ocurrencia de precipitación diaria durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.**

Sólo dos días ocurrió precipitación mayor de 10 mm, el día juliano 73 y 111 con 10.6 y 13.3 mm, respectivamente, que no fueron suficientes para abastecer estos requerimientos hídricos. En la Figura 9 se muestra el desbalance hídrico que el cultivo sufrió de forma natural, sin embargo, se abasteció con 4 riegos durante el ciclo de la avena.



**Figura 9. ETP y precipitación diaria durante el ciclo de cultivo de avena. Estación meteorológica Almaraz, Cuautitlán Izcalli, México.**

#### 4.2. Parámetro fenológico del cultivo

- Fenología. Se registró la aparición de las fases y la duración de cada etapa fenológica (Tabla 2) en cada una de las unidades experimentales (UE). La duración del ciclo del cultivo hasta la cosecha fue de 130 días; cabe mencionar que la emergencia fue la fase que se alargó (27 días) en comparación a la literatura consultada, en la cual se reporta, que esta la germinación transcurre en aproximadamente 12 días después de la siembra (DDS) (Enz y Dachler, 1998; López, 2016).

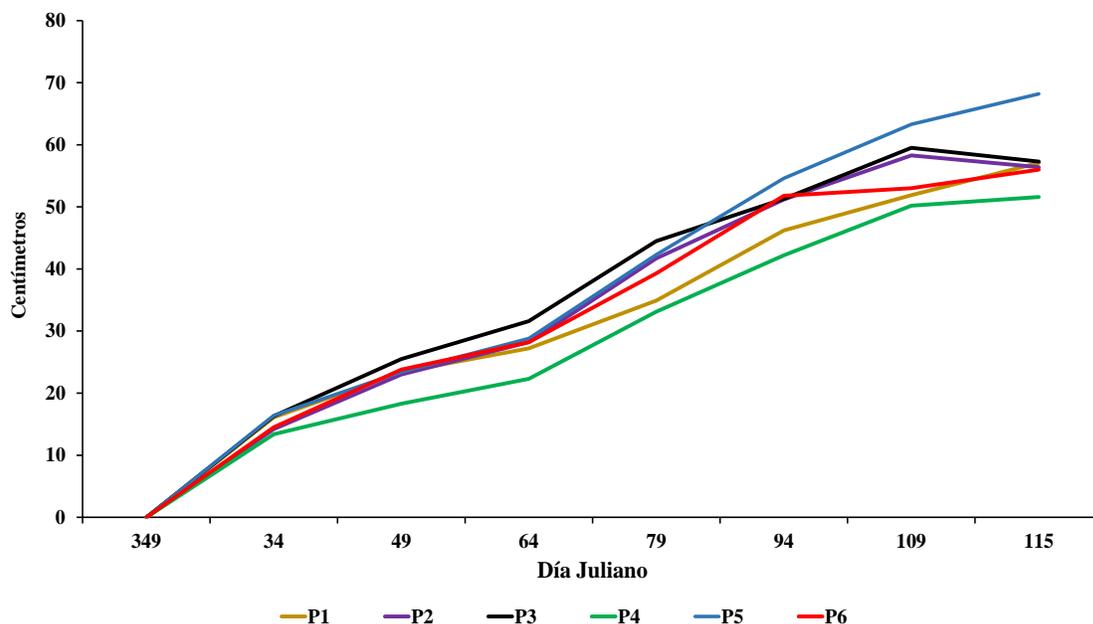
La duración de la etapa vegetativa y reproductiva fue de 37 y 30 días, respectivamente, estos datos concuerdan con los obtenidos por Baca (2020), en el ciclo O-I 2019-2020.

**Tabla 2. Fenología del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

<b>Etapa-Fase fenológica</b>	<b>Días acumulados</b>	<b>Fecha</b>
Siembra	0	15 de diciembre 2021
Germinación	27	12 de enero 2022
Vegetativa:		
Segundo par de hojas	49	03 de febrero 2022
Amacollamiento	64	18 de febrero 2022
Reproductiva:		
Inicio de floración (10 %)	87	13 de marzo 2022
Plenitud de floración (75 %)	94	20 de marzo 2022
Fructificación		
25% Inicio	99	25 de marzo 2022
80% Plenitud	102	28 de marzo 2022
Madurez Fisiológica	120	15 de abril 2022
Madurez Comercial (Cosecha)	130	25 de abril 2022
Total de días	130	

- Altura de planta. En la Figura 10 se muestran los datos promedio por UE (representada con la letra P) a lo largo del ciclo del cultivo. Fueron dos melgas de la parcela 25 del CEA donde se realizaron las observaciones; previo a la cosecha en una de ellas (P1, P2 y P3) los valores promedio de altura de planta estuvieron en el rango de 56.4 a 57.3 cm; en la otra melga (P4, P5 y P6) los valores estuvieron en el rango de 51.6 a 68.2 cm.

Se observó que la P1 y P4 presentaron la menor altura de planta, esto se debió a que en esta parte de la melga hubo mayor presencia de maleza, por lo que hubo mayor competencia con desventaja para las plantas de avena. Por lo contrario, la P5 fue una de las unidades que tuvo mayor crecimiento y rendimiento.



**Figura 10. Altura de planta (cm) del cultivo de avena por unidad experimental (P), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

Se realizó un ANOVA (Tabla 3) para descomponer la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.11 es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 muestras de datos, con un nivel del 5% de significación.

**Tabla 3. ANOVA de la altura de planta (cm) del cultivo de avena, por unidad experimental (P), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

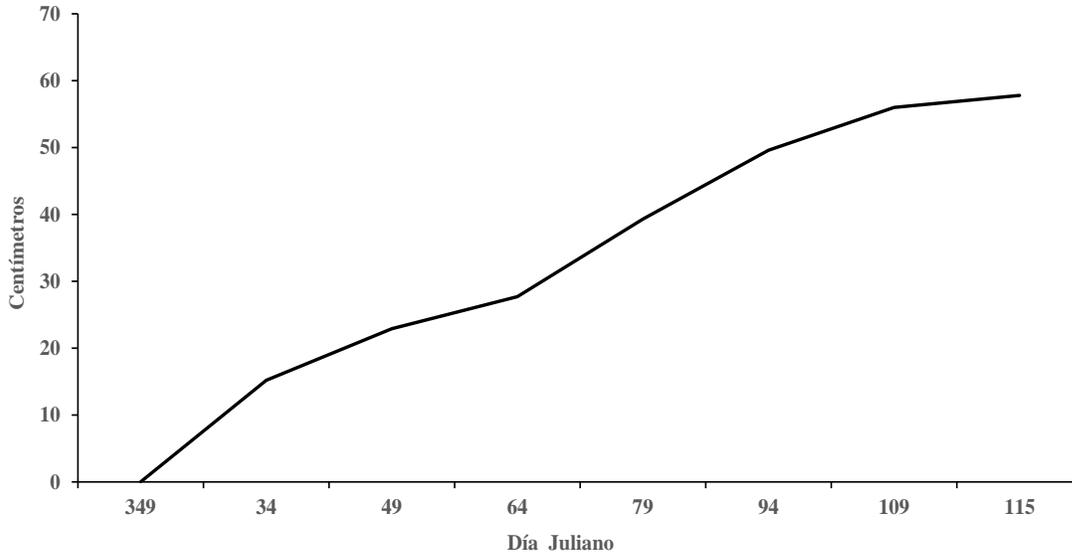
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor-P
Entre grupos	4.16667	1	4.16667	0.11	0.7543
Intra grupos	148.367	4	37.0917		
Total	152.533	5			

Al partir del supuesto del análisis de varianza donde se asume que las desviaciones estándar de todos los niveles son iguales, en este análisis se obtuvo una diferencia de 3 a 1 en ellas, por lo que se realizó la prueba de Kruskal-Wallis que evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 2 melgas es la misma. Primero se combinan los datos de todas las columnas y se ordenaron de menor a mayor. Después, se calculó el rango (rank) promedio para los datos de cada melga. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. Asimismo, se muestran las comparaciones por pares entre los rangos promedio de los 2 grupos. Usando el procedimiento de Bonferroni, 0 de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95.0% (Tabla 4).

**Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis de la altura de planta (cm) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

	<b>Tamaño de muestra</b>	<b>Rango promedio</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor-P</b>
Melga 1	3	4.0	0.428571	0.51269
Melga 2	3	3.0		
<b>Contraste</b>	<b>Significancia</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>	
Melga 1 - Melga 2	NS	1.0	2.9939	

En la Figura 11 se muestra la altura promedio general del cultivo, se puede observar un crecimiento lineal en la etapa inicial del cultivo, aun cuando se reporta una curva de crecimiento sigmoide para los cultivos de cereales, esta no se observa claramente. Es muy frecuente obtener curvas de crecimiento con la fase lineal más amplia debido a un extenso intervalo de tiempo (FaCENA, s/f).



**Figura 11. Altura promedio de planta (cm) del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

Al momento de cosechar las plantas de avena se midió lo siguiente.

1) Ancho y longitud de la hoja anterior a la hoja bandera. Los datos obtenidos oscilaron entre 0.9 y 1.1, que mostró la uniformidad de las plantas de la variedad Turquesa de este cultivo. Para el caso de la longitud de esta hoja los valores para la primera melga estuvieron en el rango de 13.4 a 14.6 cm y para la segunda de 12.3 a 16.5 cm. En la Tabla 5 se presenta el ANOVA correspondiente.

**Tabla 5. ANOVA de longitud de la hoja del cultivo avena, por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor-P
Entre grupos	0.481667	1	0.481667	0.19	0.6887
Intra grupos	10.3733	4	2.59333		
Total	10.855	5			

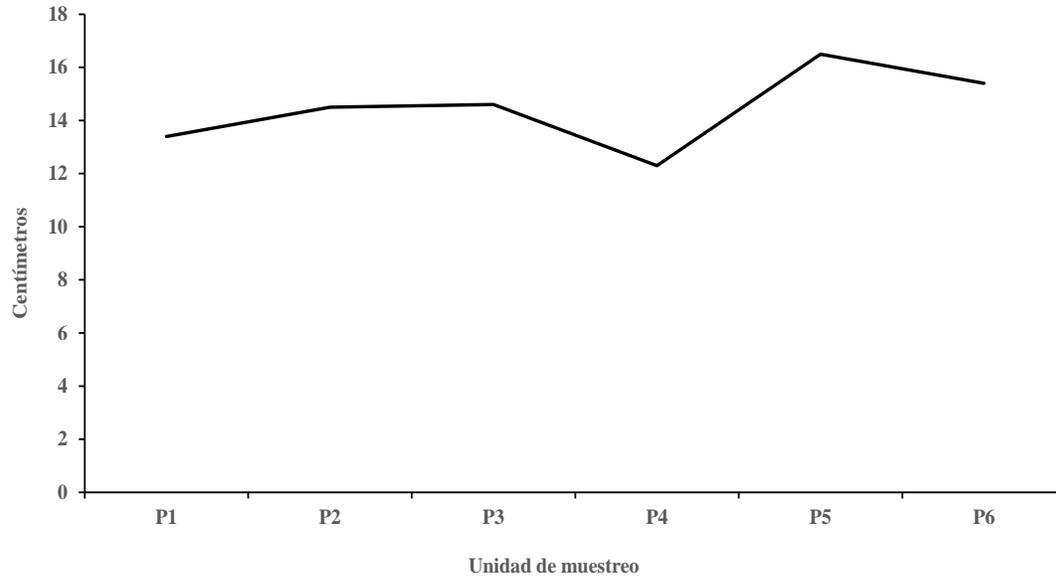
Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existió una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras de datos con un nivel del 95% de significancia.

Se obtuvo una diferencia de más de 3 a 1 entre la desviación estándar, por lo que se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar a partir de las medianas (Tabla 6). Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existió una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. Además, se muestra la comparación por pares entre los rangos promedio de los dos grupos. Usando el procedimiento de Bonferroni, ninguna de las comparaciones es estadísticamente significativa al nivel de confianza 95%.

**Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis de longitud de la hoja (cm) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

	<b>Tamaño de muestra</b>	<b>Rango promedio</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor-P</b>
Melga 1	3	3.0	0.428571	0.51269
Melga 2	3	4.0		
<b>Contraste</b>	<b>Significancia</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>	
Melga 1 - Melga 2	NS	-1.0	2.9939	

En la Figura 12 se muestran los datos obtenidos por unidad de muestreo (P1...P6). Con relación a los datos obtenidos con López (2016), quien reportó 36.2 cm de largo de hoja de avena, variedad Chihuahua (Anexo 3), se observó un menor crecimiento durante el ciclo de cultivo O-I 2021-2022, lo cual pudo deberse a un inadecuado abasto de agua de riego, que limitó el crecimiento del cultivo.



**Figura 12. Longitud de hoja (cm) del cultivo de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

#### 4.3. Acumulación de calor

Esta variable se obtuvo a partir del método residual; en la Tabla 7 se presentan las unidades calor (UC) por cada etapa fenológica, en total se acumularon 1,336.6 UC.

Al comparar los resultados con los reportados por López (2016) quien obtuvo una acumulación de 1,185.4 UC, se presentó una diferencia de 151.2 UC más en este ciclo O-I 2021-2022. La diferencia se debió a la duración total de las etapas fenológicas del cultivo de avena, en este caso fue de 130 días y en el caso de López, (2016) fue de 118 días. La etapa vegetativa acumuló más UC debido a que tuvo mayor duración (5 días más que en 2016), y la etapa de reproducción acumuló menos UC que en año 2016, ya que ocurrió más rápido.

Con respecto a la temperatura en el día 89 Juliano (Figura 7) que corresponde al 30 de marzo, se registraron las temperaturas máximas en toda la duración del cultivo, pero estas no coinciden con la etapa donde se acumularon más UC por lo que, se deduce que las temperaturas no afectaron la acumulación de UC en la etapa vegetativa, sino que fue la duración de esta.

**Tabla 7. Duración de las etapas fenológicas del cultivo de avena y acumulación de unidades calor (UC), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

<b>Etapas fenológicas</b>	<b>Días</b>	<b>UC</b>
Siembra	0	0
Germinación	27	228.8
Vegetativa	60	557.1
Reproductiva	12	139.9
Fructificación	21	269.7
Madurez Fisiológica	10	141.1
Cosecha		
<b>Total</b>	<b>130</b>	<b>1,336.6</b>

#### 4.4. Rendimiento

- Peso en base húmeda

Después del corte se pesó la avena de cada unidad de muestreo, los valores promedio de las dos muestras estuvieron en el rango de 8.03 a 17.52 ton ha<sup>-1</sup> y de 3.11 a 13.79 ton ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El promedio general fue de 10.87 ton ha<sup>-1</sup>.

Posteriormente se realizó un ANOVA (Tabla 8) donde la razón-F, es igual a 0.846582. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 95% de significación.

**Tabla 8. ANOVA del rendimiento en base húmeda de forraje de avena (t ha<sup>-1</sup>), por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Razón- F</b>	<b>Valor-P</b>
Entre grupos	21.9268	1	21.9268	0.85	0.4096
Intra grupos	103.602	4	25.9004		
Total	125.528	5			

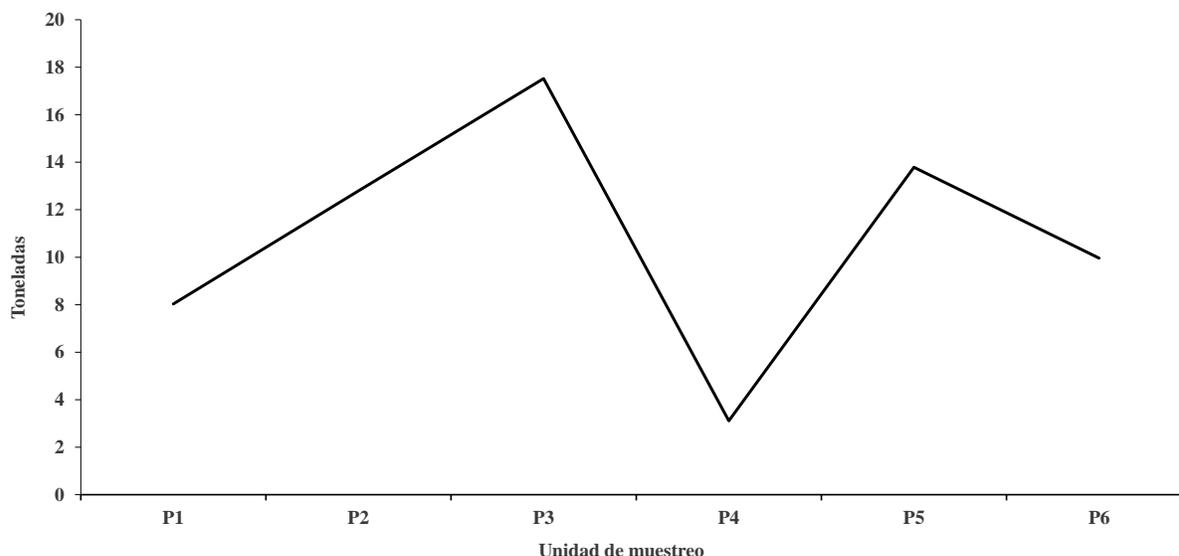
Se realizó la Prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 9) la cual compara las medianas en lugar de las medias, esto con la finalidad de tener certeza de no cometer error de existir valores atípicos.

Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadística significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. La segunda parte del desplegado muestra comparaciones por pares entre los rangos promedio de los dos grupos. Usando el procedimiento de Bonferroni, 0 de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95%.

**Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis del rendimiento en base húmeda de forraje ( $t\ ha^{-1}$ ) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

	<b>Tamaño de muestra</b>	<b>Rango promedio</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor-P</b>
Melga 1	3	4.0	0.428571	0.51269
Melga 2	3	3.0		
<b>Contraste</b>	<b>Significancia</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>	
Melga 1 - Melga 2	NS	1.0	2.9939	

La Figura 13 muestra el rendimiento en base húmeda, donde se observa una relación con la longitud de hoja (Figura 12); las unidades que tuvieron menores longitudes corresponden a un menor rendimiento, y viceversa, el mayor rendimiento fue con la mayor longitud de hoja.



**Figura 13. Rendimiento en base húmeda de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

- Peso en base seca

Los valores promedio de las muestras de cada melga, estuvieron en el rango de 2.65 a 6.29  $ton\ ha^{-1}$  y de 1.1 a 5.29  $ton\ ha^{-1}$ , respectivamente. El promedio general fue de 3.99  $ton\ ha^{-1}$ .

En la Tabla 10 se muestra el ANOVA correspondiente a esta variable; la razón-F, que en este caso es igual a 0.550388 y puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadística significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 95% de significancia.

**Tabla 10. ANOVA del rendimiento en base seca de forraje de avena ( $t\ ha^{-1}$ ), por unidad experimental (P), ciclo O-I 2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón- F	Valor-P
Entre grupos	2.14802	1	2.14802	0.55	0.4994
Intra grupos	15.6109	4	3.90273		
Total	17.7589	5			

Se realizó la Prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 11) donde el valor-P es mayor o igual que 0.05, por lo tanto, no existió una diferencia estadística significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. La segunda parte del desplegado muestra comparaciones por pares entre los rangos promedio de los 2 grupos. Al utilizar el procedimiento de Bonferroni, 0 de las comparaciones son estadísticamente significantes al nivel de confianza 95%.

**Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis del rendimiento en base seca de forraje ( $t\ ha^{-1}$ ) del cultivo de avena, por melga, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

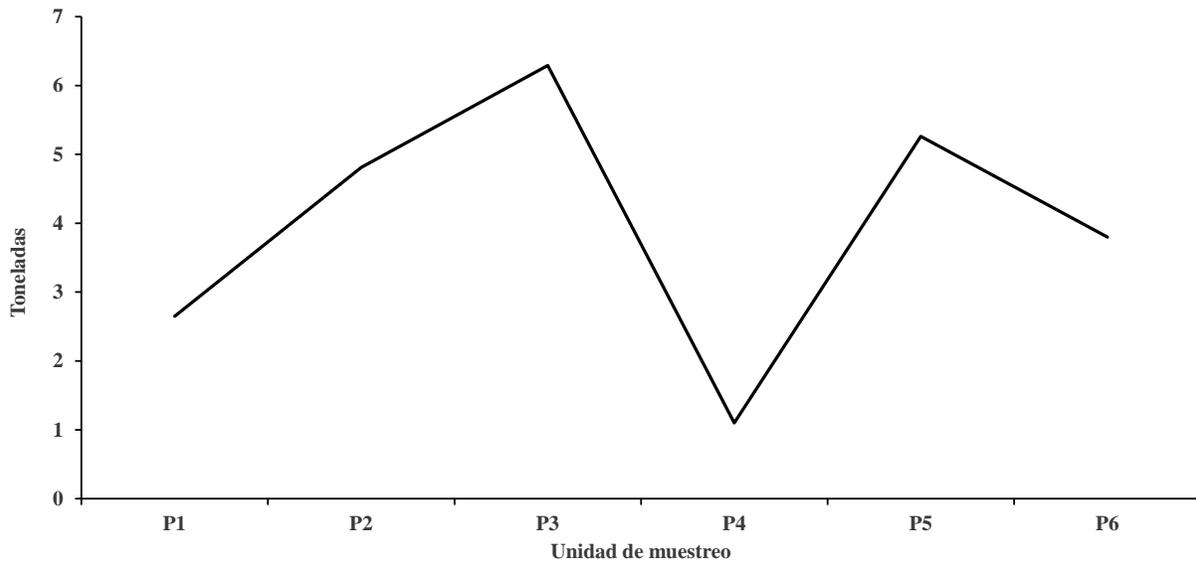
	<b>Tamaño de muestra</b>	<b>Rango promedio</b>	<b>Estadístico</b>	<b>Valor-P</b>
Melga 1	3	4.0	0.428571	0.51269
Melga 2	3	3.0		
<b>Contraste</b>	<b>Significancia</b>	<b>Diferencia</b>	<b>+/- Límites</b>	
Melga 1 - Melga 2	NS	1.0	2.9939	

En la Figura 14 se presentan los datos obtenidos de forraje en base seca, que es uno de los parámetros más importantes para evaluar el rendimiento de un forraje. Como se mencionó anteriormente, no existe diferencia estadística significativa entre las muestras.

En comparación con López (2016) quien obtuvo un rendimiento promedio en base seca de 16.31  $ton\ ha^{-1}$  con la variedad Chihuahua, en esta investigación se trabajó con la variedad Turquesa, lo cual no significa que las diferencias en el rendimiento obtenidas se atribuya al cambio de la variedad, puesto que Villaseñor *et al.* (2009) reportaron que la variedad Turquesa es superior en rendimiento a la Chihuahua, con un rango de 7.46 a 11.98  $ton\ ha^{-1}$  y 3.26 y 10.25  $ton\ ha^{-1}$ , respectivamente, para cada variedad, por lo que probablemente el manejo agronómico del cultivo en campo fue la causa de los menores rendimientos obtenidos en este ciclo O-I 2021-2022.

Aun cuando se aplicaron 4 riegos durante el ciclo del cultivo, los riegos fueron ineficientes ya que los intervalos entre ellos fueron amplios, en parte debido a la baja disponibilidad de agua en el canal de riego, esto influyó en la falta de uniformidad en la parcela, puesto que algunas partes se anegaban mientras que otras quedaron con menos agua disponible para la

planta. Es importante señalar que la fenología del cultivo y el rendimiento se ven seriamente afectados por un inadecuado manejo agronómico. Asimismo, esos encharcamientos generaron en algunas partes de las parcelas, la mayor emergencia de maleza quien compitió con el cultivo.



**Figura 14. Rendimiento en base seca de forraje de avena (t ha<sup>-1</sup>), ciclo O-I 2021-2022. Cuautilán Izcalli, México.**

- Análisis químico proximal

Después de obtener el peso en seco de todas las muestras, se obtuvo una muestra general y se realizó el análisis químico proximal, en la Tabla 12 se muestran los resultados.

**Tabla 12. Análisis químico proximal del forraje de avena, ciclo O-I 2021-2022. Cuautitlán Izcalli, México.**

<b>Variable</b>	<b>Base húmeda (%)</b>	<b>Base seca (%)</b>
Materia seca	94.07	100.0
Humedad total	5.93	0.00
Extracto etéreo	5.18	5.51
Cenizas	7.63	8.11
Proteína cruda	6.81	7.24
Fibra cruda	26.3	27.96
Extracto libre de nitrógeno	48.14	51.18

López (2016) obtuvo en el análisis correspondiente, valores de extracto etéreo (EE) de 3.13%, cenizas (CZ) de 10.9%, proteína cruda (PC) de 8.7%, fibra cruda (FC) de 33.30% y extracto libre de nitrógeno (ELN) de 43.08%. Por su parte, Mamani y Cotacallapa (2018) obtuvieron bajo condiciones del altiplano de Puno  $7.95 \pm 1.58$  % de MS,  $5.60 \pm 0.67$  % de CN,  $8.67 \pm 0.64$  % de PC y  $7.99 \pm 0.70$  % de EE.

Con relación a lo anterior los resultados del AQP obtenidos en esta investigación, muestran relación a los obtenidos por los autores citados. Ramírez *et al* (2013) mencionaron que en general, la composición química del forraje de avena está influenciada por la estación de crecimiento, y la etapa de madurez al corte tiene mayor impacto, especialmente cuando inicia la floración y el desarrollo del grano. Mamani y Cotacallapa (2018) señalaron que las diferencias también se deben a la variedad, la fertilización y a la fertilidad natural del suelo.

Con base al análisis de los parámetros anteriores y del comportamiento de la fenología del cultivo de avena, el parámetro climático considerado no contribuyó de manera significativa a la duración de las fases fenológicas y a los efectos negativos en el rendimiento, puesto que la temperatura se mantuvo en valores adecuados al cultivo. Por otro lado, las necesidades hídricas del cultivo, no se cubrieron satisfactoriamente a pesar de los cuatro riegos que se aplicaron, y que se reflejó en el bajo rendimiento obtenido en este trabajo.

En cuanto a la fenología el atraso de la fase de emergencia se debió a la falta de agua de riego, lo que tuvo como consecuencia una mayor acumulación de unidades calor al final del ciclo del cultivo.

La altura de planta fue una variable que mostró el efecto de un crecimiento deficiente, puesto que la literatura señala que la avena alcanza una altura de hasta 150 cm, en este caso, los valores máximos no sobrepasaron los 70 cm. Mendoza (2020) mencionó que la altura en las gramíneas está determinada por la disponibilidad de agua, por lo que, la mayoría de las plantas estresadas tienen menor altura. Además, el estrés hídrico afecta negativamente la cantidad y calidad del rendimiento de la planta, especialmente en el peso en base húmeda y base seca. Con respecto a estas dos variables los valores máximos obtenidos en seco en este estudio fueron de 5.29 y 6.29 ton ha<sup>-1</sup>, los cuales se encuentran por debajo a los reportados SAGARPA (2017), los cuales están en un rango de 9 a 15 ton ha<sup>-1</sup>. Finalmente, el peso fresco es directamente proporcional al seco, pero esta variable es menos empleada para medir el rendimiento debido a que el forraje de avena siempre se comercializa en seco por su facilidad de manejo y transporte.

A pesar de que el rendimiento no fue el esperado, el forraje que se obtuvo con la variedad Turquesa mostró valores aceptables en el análisis químico proximal.

## V. CONCLUSIONES

1. Se cumplieron los objetivos e hipótesis planteados, y se describió el comportamiento fenológico del cultivo de avena forrajera, donde la temperatura no tuvo efecto significativo en esta temporada, mientras que el manejo agronómico del riego sí afectó de manera significativa el rendimiento de forraje.
2. El ciclo del cultivo tuvo una duración de 130 días, con un total de 1336.6 UC. La duración de las etapas en días después de la siembra fue la siguiente: germinación 27 días, vegetativa 60 días, reproductiva 12 días, fructificación 21 días y madurez fisiológica 10 días. Asimismo, la altura de planta en la dos melgas fue de 56.4 a 57.3 cm y 51.6 a 68.2 cm, respectivamente, las cuales son inferiores a lo reportado en la ficha técnica de la variedad.
3. El rendimiento del forraje en base húmeda estuvo en el rango de 8.03 a 17.52 ton ha<sup>-1</sup> para la primer melga y para la segunda de 3.11 a 13.79 ton ha<sup>-1</sup>, por otro lado, el de materia en base seca fue de 2.65 a 6.29 ton ha<sup>-1</sup>, y de 1.1 a 5.26 ton ha<sup>-1</sup> para la primer y segunda melga respectivamente, los cuales no fueron óptimos en este ciclo de O-I. Los promedios generales fueron de 10.87 ton ha<sup>-1</sup> y 3.99 ton ha<sup>-1</sup>, de forraje en base húmeda y base seca, respectivamente.
4. El contenido nutrimental de la avena fue adecuado con valores similares a otros investigadores, con 7.24% de PC, 5.51% de EE, 8.11% de CZ, 27.96% de FC y 51.18% de ELN.
5. Finalmente, para una mejor evaluación de la fenología de los cultivos, se debe de procurar un adecuado manejo agronómico, para que este factor no influya en el crecimiento y desarrollo de las plantas y los resultados esperados estén más influenciados por el factor climático.

## VI. LITERATURA CITADA

1. Alvarado, M.A., Foroughbakhch, R., Juarado, E., Rocha, A. 2002. El cambio climático y la fenología de las plantas, *Ciencia UANL*, 5(4): 493-500.
2. Angeles, F.S.B. 2022. Determinación de la normal climática de 1987 a 2022 de la Estación Meteorológica Almaraz. Tesis de Licenciatura Ingeniería Agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México. 106 pp.
3. Baca, V.E. 2020. Manejo de la estación meteorológica Almaraz. Reporte de Servicio Social. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. México.
4. Bleken, M.A., Skjelvag, A.O. 1986. The phenological development of oat (*Avena sativa* L.), cultivars as affected by temperature and photoperiod. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 36(4): 353-365.
5. Bonnett, O.T. 1961. The oat plant: its histology and development. University of Illinois. Agricultural Experimental Station, Urbana USA. boletín 672. 112 pp.
6. Bórnez, M.K. 2021. Study of vegetation dynamics from satellite: phenological responses to climate change. Tesis de doctorado. Universitat Autònoma de Barcelona. España.
7. Cara, G.J.A. 2006. La observación fenológica en Agrometeorología. Servicio de Aplicaciones Meteorológicas. I.N.M.
8. Cháves, C.B., González, M.C., Alvarado, M.F., Castañeda, L.F., Guzmán, P., J., Barrientos, F. J., Roca, F. M., Quintero C, M., López, M. M., Castañeda L.N., Martínez, P., Flórez, R.V., Cuervo, B.W., Esmeral, V. Y. 2011. Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia
9. Cibrián, T.J., De la Cruz, C.E., Bautista, S.J.A., Soto, H.R.M., Salomé, A.L.F. 2017. Producción y contenido nutrimental en avena forrajera fertilizada con fuentes químicas y orgánicas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40 (3): 317-324.
10. Enz, M., Dachler, N. 1998. Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas escala BBCH extendida. En <https://www.agro.basf.es>. Fecha de consulta 01 de marzo 2022.
11. Espitia, R.E., Villaseñor, M.H.E., Tovar, G.R., Olán O.M., Limon, O.A. 2012. Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(4): 771-783.

12. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. s/f. Crecimiento. Cinética de crecimiento. En: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Crecimiento.pdf>. Fecha de consulta el 10 de junio de 2022.
13. FAO (Food and Agriculture Organization). 2015. Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. En: <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/#:~:text=Los%20suelos%20proporcionan%20los%20nutrientes,necesitan%20para%20crecer%20y%20florecer>. Fecha de consulta 17 de marzo del 2022.
14. Flórez, G.C. 2018. Métodos de Estudio: Fenología de Plantas. Asociación Primatológica de Colombia. En: <https://www.asoprimatologicacolombiana.org/notas-redprim/metodos-de-estudio-fenologia-de-plantas>. Fecha de consulta el 25 de marzo de 2022.
15. Gobierno de Mexico. s/f. Avena Forrajera Monografía. En: <https://www.gob.mx/Avena-forrajera-monografias>. Fecha de consulta 01 de febrero de 2022.
16. Gondal, M.R., Riaz, A., Rizvi, S.A., Matloob, A., Naseem, W., Hussain, A., Hanif, M.S. 2020. Sowing Techniques Techniques and Cultivars Influence Phenology, Productivity and Profitability of Forage Oat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24(6): 1527-1532.
17. Granados, R.R., Sarabia, R.A.A. 2013. Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3): 435-446.
18. Hudson, I.L. Keatley, M.R. 2010. *Phenological research: methods for environmental and climate change analysis*. Springer.
19. Hjelkrem, A.G.R., Torp, T., Brodal, G., Aamot, H.U., Strand E., Nordskog, B., Macky, R.D., Edwards, S.G., Hofgaard, I.S. 2017. DON content in oat grains in Norway related to weather conditions at different growth stages. *Eur J Plant Pathol*, 148: 577-594.
20. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). s/f. Unidades Calor base 10. En: <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Principal/unidadesCalor>. Fecha de consulta 10 de febrero de 2022.
21. Jarma, O.A., Cardona, A.C., Araméndiz, T.H. 2012. Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15 (1): 63-76.
22. Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehanchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhufacensis, D.M., Gealy, D.R., Moss, S.R., Burgos, N.R., Miller, M.R., Palhano, M. 2016. Cultivares para enfrentar los efectos del cambio climático en cultivos y malezas: una revisión. *Agron. Sostener. Desarrollo* 36:12.

23. León, P.R.I., Correa, A.E.M., Romero, F.J.L., Bonilla, H. A., Gómez; C.J.C., Yacomelo, H.M. J., Artiles, L.P. 2019. Acumulación de grados días y su efecto sobre el potencial de rendimiento de 15 accesiones de berenjena (*Solanum melongena* L.) en el Caribe Colombiano. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 72(3): 1-10.
24. López, A.H. 2016. Respuesta del cultivo de avena forrajera a la aplicación de lixiviados de lombricomposta. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
25. Luna, F.W., Estrada, M.H., Jiménez, O.J.J.M., Pinzón, L.L.L. 2012. Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. Terra Latinoamericana, 30(4): 343-353.
26. Mamani, P.J., Cotacallapa, G.F.H. 2018. Rendimiento y calidad nutricional de avena forrajera en la región de Puno. Revista de Investigaciones Altoandinas, 20(4): 385-400.
27. Martínez, S. 2017. Climatología y fenología agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.
28. Mendoza, L.K.K. 2020. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en genotipos de avena forrajera en la sierra altoandina. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 125 pp.
29. 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.
30. Matsoukis, A., Kamoutsis, A., Chronopoulou, S.A. 2018. Air temperature effect on end of flowering of *Cirsium arvense* (L.) Scop. In a mountainous region of greece. Journal of Animal & Plant Sciences, 28(1): 100-106.
31. Murphy, G., Hurtado, R. 2011. Agrometeorología. En: <https://dokumen.tips/documents/agrometeorologia-murphy-guillermo-1.html>. Fecha de consulta 16 de marzo de 2022.
32. Moreno, F.L.P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agronomía Colombiana, 27(2): 179-191.
33. Peltonen, S.P., Rajala, A. 2007. Duration of vegetative and generative development phases in oat cultivars released since 1921. Field Crops Research, 101(1): 72-79.

34. Ramírez, A., Mondragón, D., Rivera, R. 2021. Vascular Epiphytes: The Ugly Duckling of Phenological Studies. *Acta Biológica Colombiana*, 26(2): 247-261.
35. Ramírez, O.S., Domínguez, D.D., Salmerón, Z.J.J., Villalobos V.G., Ortega, G.J.A. 2013. Producción y calidad del forraje de variedades de avena en función del sistema de siembra y de la etapa de madurez al corte. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4): 395-403.
36. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Avena Forrajera Mexicana. 20 pp.
37. Santos, J., Canali, L.N., Patussi, B.S., Scheffer, B.S.M. 2017. Instability of the expression of morphological and phenological descriptors to environmental variation in white oat. *Semina: Ciencias Agrarias*, 38(2): 683-698.
38. Schwartz, M.D. 2013. *Phenology: an integrative environmental science (Second edition)*. Springer.
39. Shaykewich, C.F. 1995. An appraisal of cereal crop phenology modelling, *Canadian Journal of Plant Science*, 75(2): 329-341.
40. SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2018. Atlas Agroalimentario 2012-2018. 215 pp.
41. SIAP. 2020. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. En: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta el 15 de febrero de 2022.
42. SIAP. 2020. Panorama Agroalimentario 2020. En: [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020)
43. Siebert, S., Ewert, F. 2012. Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152: 44-57.
44. Sonogo, M. 2000. Effect of temperature and daylength on the phenological development of oats (*Avena sativa* L.). Tesis de Doctorado. Lincoln University. En: [https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/1622/sonogo\\_phd.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://researcharchive.lincoln.ac.nz/bitstream/handle/10182/1622/sonogo_phd.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Fecha de consulta el xx de febrero de 2022.
45. Suttle, J.M. 2003. Conservación de heno y paja: para pequeños productores y en condiciones pastoriles. Serie de Producción y protección vegetal de la FAO No.29. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.

46. Stevens, E.J., Armstrong, K.W., Bezar, H.J., Griffin, W.B., Hampton, J.G. 2004. Chapter II - Fodder Oats: An Overview. En: Suttie, J.M., Reynolds, S.G. (Eds.). FODDER OATS: a world overview. Plant Production and Protection Series No. 33. FAO. Roma. Italy.
47. UC (Universidad Católica de Chile). 2012. Avena. En: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/cultivos/cereales/avena.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/avena.htm). Fecha de consulta el 20 de febrero de 2022.
48. UPNA (Universidad Pública de Navarra). s/f. Flora Pratense y Forrajera Cultivada de la Península Ibérica familia Gramineae, Avena sativa L.: avena. En: [https://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Aven\\_sati\\_p.htm](https://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/Aven_sati_p.htm). Fecha de consulta el 01 de febrero de 2022.
49. Vázquez, C.1992. La fisiología ecológica de plantas. Ciencias, 5: 63-68.
50. Vázquez, G.E., Román, A.E.E., Ariza, F.R. 2008. Fenología y unidades caloríficas de genotipos de papayo en el sur de Tamaulipas, México. Revista Fitotecnia Mexicana, 31(3): 45-48.
51. Villaseñor, M.H.E., Espitia, R.E., Huerta, E.J., Osorio, A L., López, H.J. 2009. Turquesa, nueva variedad de avena para la producción de grano y forraje en México. Agricultura Técnica en México, 35(4): 487-492.
52. Villazón, B.D., Rubio, A.H. Ochoa, R.J.M., De la Mora, C. 2017. Pronóstico productivo de la avena forrajera de temporal por efecto del cambio climático en el noroeste de Chihuahua, México. Nova Scientia, 9(19): 551-567.
53. Yepes, A., Silveira, B.M. 2011. Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (Revisión). Colombia Forestal, 14 (2): 213-232.
54. Yzarra, T.V.J., López, R.F.M. 2011. Manual de Observaciones Fenológicas. Ministro de Agricultura Perú. 97 pp.

# **ANEXOS**

## **Anexo1. Características técnicas de la variedad Turquesa del cultivo de avena**

Variedad con alto rendimiento de grano y forraje que se recomienda para siembras de temporal y riego en México. Alta relación grano-paja para producir forraje achicalado de mayor calidad energética. Resistencia a la roya de tallo y de la corona. Tolerancia a enfermedades foliares.

- Alto rendimiento en grano
- Alto rendimiento forraje verde y henificado
- Alto rango de adaptación
- Altitud de 1900-3000 msnm
- Menor contaminación ambiental
- Bajos costos de producción
- Excelente calidad de grano y forraje
- Aceptación en el mercado

Follaje verde oscuro, raíz fuerte y tolerante a la sequía, inserción de panoja 30 cm de la planta.

<b>Información</b>	<b>Descripción</b>
Género o Especie	Avena sativa
Lugar de Producción	Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán
Categoría	Certificada
Densidad de siembra	120-150 kg/ha Grano de 6 ton Forraje hasta 15 ton
Días de Madurez	130 días
Ciclo de Vida	Intermedio de 75 a 80 días
Altura de planta	150 cm
Enfermedades	Resistente a la roya del tallo y grano

Fuente: Elaboración propia con datos de: <https://semillasbarriga.com/producto/avena-turquesa/>

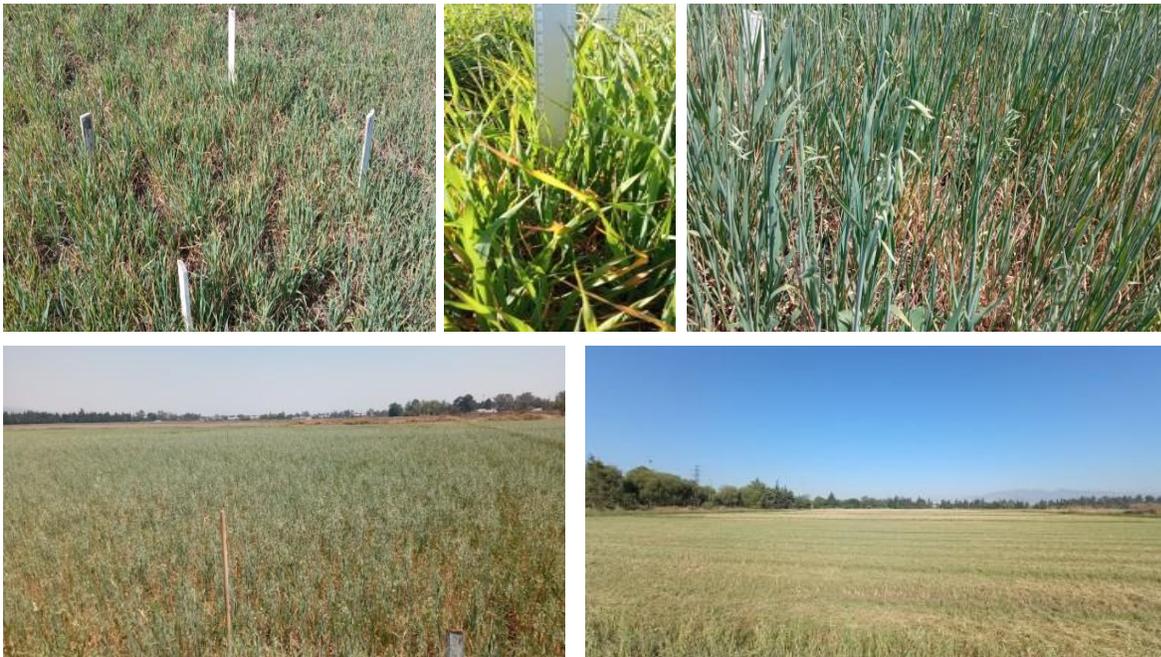
Semilla trata con: Carbocaptan, K-Obiol y rodamina, como fungicida, insecticida y colorante respectivamente, no utilizar para consumo humano o animal. Semillas Barriga: No se responsabiliza por el mal uso de la semilla que pudiera afectar al rendimiento del cultivo o algún efecto ambiental.

## Anexo 2. Imágenes del desarrollo del trabajo en campo

- Sitios de muestreo en cada melga en campo.



- Desarrollo fenológico del cultivo de avena.



## Continuación Anexo 2.

- Cosecha de las unidades experimentales y trabajo en laboratorio



- Secado de muestras para realizar el AQP.



### Anexo 3. Características técnicas de la variedad Chihuahua del cultivo de avena

Con esta nueva variedad se obtiene la mayor rentabilidad, es una variedad con hábito de primavera y O-I, en P-V. es susceptible a roya, condiciones normales para O-I.

- Alto rendimiento de grano
- Alto rendimiento forrajeo
- Menor contaminación ambiental
- Reducción en costos de producción
- Fechas de siembra tempranas y tardías

Resistente a la roya del tallo y grano, las plantas alcanzan una altura aproximada de 150 cm.

<b>Información</b>	<b>Descripción</b>
Género o Especie	<i>Avena sativa</i>
Área de adaptación	Altitud hasta 3000 msnm
Lugar de Producción	Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán
Días de madurez	130 días
Rendimiento de grano	6 ton/ha
Rendimiento de forraje	Hasta 15 ton/ha
Densidad de siembra	120-150 kg/ha

Fuente: Elaboración propia con datos de: <https://semillasbarriga.com/producto/avena-chihuahua/>