

Modelo predictivo de la producción de aguacates en Michoacán: desde la siembra hasta la cosecha.

Introducción

Las flores, frutas, vegetales y hongos representan un pilar fundamental en la cadena alimentaria [8]. La industria agrícola, responsable de su producción continua, enfrenta desafíos crecientes debido a la incertidumbre respecto a las condiciones de cultivo, las cuales se han visto afectadas, en gran parte, por el cambio climático [29].

Respecto a las estaciones del año, el cambio climático ha implicado un desfase en ellas. Las cuatro estaciones del año se definen a partir de criterios biológicos y físicos [43]. De esta manera, se ha conseguido determinar que, en el hemisferio norte, la duración del verano se ha prolongado significativamente; mientras que el resto de estaciones se han reducido y se especula que esta tendencia se exacerbe en los próximos años [44], tanto por factores naturales como por factores ligados a la actividad humana [30].

Estas alteraciones repercuten en diversos aspectos, entre ellos el ciclo de producción agrícola, debido a variaciones inusuales e inesperadas en temperatura, precipitación y patrones de migración de polinizadores, entre otros factores. Los cuales, en conjunto, han modificado las zonas, temporadas y rendimiento de los cultivos [4, 12, 29].

Esto es especialmente relevante, ya que la estabilidad de los procesos productivos depende de cierta consistencia en las condiciones ambientales. Sin embargo, las condiciones actuales a las que nos enfrentamos han incrementado la inestabilidad en la seguridad alimentaria y el desabasto a la par de reducir la producción y exportación, impactando directamente la economía de las naciones [17].

Cada cultivo prospera dentro de umbrales ambientales específicos, que en muchos casos, han sido ya previamente descritos; e.g., el aguacate [25, 35]. En México, la producción del aguacate (*Persea americana* Miller) se ha estandarizado para desarrollarse en dos etapas: crecimiento en vivero (10 – 12 meses) y trasplante al suelo, donde permanecerá el resto de su vida productiva [41]. La transición entre ambas, particularmente las cuatro semanas posteriores del cultivo en campo [32], determina en gran medida el éxito del árbol a largo plazo.

De acuerdo con Campos-Rojas *et al.* (2012) [7], la plantación en semilleros de viveros se recomienda que se ejecute entre marzo y mayo. Por tanto, al considerar la duración de la etapa de crecimiento en vivero antes mencionada, proveniente de [41], puede inferirse que el trasplante al suelo puede llevarse a cabo entre enero y mayo del año siguiente. Lo anterior es consistente con Salinas-Vargas *et al.* (2021) [40] en donde se sugiere que, en Sinaloa, la plantación en campo se lleve a cabo entre los meses de febrero y marzo u octubre y noviembre, puesto que se aconseja evitar el trasplante durante el verano.

La transición de plantación en vivero hacia la plantación en suelo, conocida como impacto del trasplante, o *transplant shock* en la literatura en inglés, implica un estrés biótico y abiótico significativo debido a la exposición a condiciones ambientales [11, 23]. Por tanto, este fenómeno puede provocar la pérdida de plantas, afectando la producción, exportación y rentabilidad del cultivo [37].

Tras el trasplante, la floración ocupa un papel crucial en la producción pues de ella depende la cantidad de frutos disponibles y, de acuerdo con Salazar–García *et al.* (1999) [39], temporadas con temperaturas bajas y periodos nocturnos largos, seguidos de un pequeño incremento en la temperatura, maximizan el desarrollo de las estructuras anatómicas que darán paso a la formación de flores de aguacate. En México, este proceso se ubicaría temporalmente entre el otoño y el invierno [1].

Aunado a lo anterior, aún cuando la exposición a la luz solar resulta indispensable para la fotosíntesis de los árboles de aguacate, una exposición prolongada puede reducir la calidad de los frutos y generar quemaduras en los tallos y ramas, las cuales necrosan los tejidos y los dejan susceptibles a infecciones bacterianas y hongos [18]. Asimismo, la exposición al sol interviene en el alza de la temperatura del suelo y la disminución de la humedad a través de la evaporación acelerada [20]. Por tanto, se emplean mezclas de cal y cobre, en igualdad de proporciones, a manera de protector solar, además de cubrir las bases de los árboles con rastrojo para preservar la humedad y temperatura del suelo [40].

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [41], México es el principal productor y exportador mundial de aguacate actualmente, con 23 regiones productoras a nivel nacional. Para garantizar un desarrollo óptimo, se recomienda un pH del suelo entre 5.5 y 7, precipitaciones anuales de 1200 mm uniformemente distribuidos, ausencia de heladas y vientos calurosos secos, altitudes entre 800 y 2800 m.s.n.m. y temperaturas entre 12° C y 33° C [40].

De esta manera, al vigilar y cuidar el proceso productivo, un árbol de aguacate que sobrevive al trasplante y se siembra en una zona y temporada ideal, será capaz de producir su primera producción comercial entre los tres y cuatro años de edad, con una producción promedio de 75 Kg, mas se estabilizará a entre 180 y 200 Kg de producción a los nueve años de edad [31]. Además, cada árbol tendrá aproximadamente una vida económica productiva de 40 años, la cual comienza a decaer un 5% anual a partir de los 30 años de edad [26].

Efectos del estrés agrícola derivado del cambio climático

A gran escala, la industria agrícola responde a una amplia variedad de elementos que, según su procedencia, permanencia, frecuencia e intensidad, pueden modificar su desarrollo de manera neutra, favorable o adversa. En este sentido, el estrés agrícola proviene de diversas fuentes y se manifiesta con distinta magnitud y recurrencia. En esta sección abordaremos particularmente las repercusiones del estrés agrícola atribuibles al cambio climático, clasifi-

cándolas en factores bióticos, abióticos y socioeconómicos.

El impacto del cambio climático ha sido profundamente significativo; en particular, la agricultura se considera la actividad más amenazada por este fenómeno [5, 34]. Ello se debe a que, en general, la mayoría de estresores que inciden sobre los sistemas agrícolas tienen como origen directo o indirecto al cambio climático [28, 34, 42]. Por lo anterior, centramos nuestro marco de trabajo en analizar las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de consumo, que se presentan a continuación.

Factores bióticos

Salud del cultivo

Test

Test1

Variabilidad genética

Factores abióticos

Cambio climático Recursos hídricos Recursos en suelo

Actividades humanas

Políticas públicas Interés mercantil Seguridad laboral en el campo

Revisión del estado del arte

Actualmente, la predicción climática aún es un reto [24]. No obstante, en trabajos previos como los de Elnesr *et al.* [15, 16] se han desarrollado metodologías deterministas para pronosticar temporadas óptimas para la siembra de distintos tipos de cultivos. Lo anterior, basándose en el concepto de unidades de calor, donde el sistema de unidades de calor se basa en la acumulación promedio de las temperaturas diarias y los umbrales de temperatura respectivos al tipo de cultivo [10].

Similarmente, existen más metodologías que basan su análisis únicamente en datos de temperaturas; por ejemplo, los trabajos de Flores–Gallardo *et al.* (2012) [19], Narayan *et al.* (2014) [27] y Callejas–Rodríguez *et al.* (2023) [6]. Más aún, tales metodologías han sido aplicadas en zonas de cultivo para evaluar su efectividad y comparar los resultados que se obtienen con la implementación de las distintas metodologías.

De acuerdo con registros de producción agrícola de 2023 del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), disponibles en http://infosiap_siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.

php, el estado de Michoacán es considerado como el principal productor de aguacate a nivel nacional, siendo Tancátaro, Tacámbaro, Uruapan, Ario y Peribán los municipios con mayor valor de producción. Por tanto, al focalizar el análisis en esta zona geográfica, podríamos garantizar los niveles de producción a largo plazo.

Más aún, al incorporar de manera conjunta tanto datos edáficos, eólicos e hídricos, así como también las unidades de calor, podríamos esperar resultados más detallados al considerar las metodologías de aprendizaje automático. En específico, la plataforma Essenger [36], del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), alberga datos históricos diarios, desde 1980 a 2022, de temperatura máxima y mínima del aire, horas de luz, radiación de onda corta, lluvia líquida y presión del vapor de agua.

Asimismo, la plataforma Malla Suelos México, del INIFAP y disponible en <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/DatosIndirectos/MSMx>, contiene datos del suelo sobre la densidad aparente, contenido de arcilla, capacidad de intercambio catiónico, fragmentos de roca, nitrógeno, densidad de carbono orgánico, arena y sedimento, además del pH del agua. Los datos antes mencionados fueron medidos a distintas profundidades, en un rango de 0 a 200 cm.

Adicionalmente, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), mantiene registros históricos diarios referentes a la precipitación, evaporación, temperatura máxima y temperatura mínima; tales datos provienen de las estaciones climáticas dispersas por el territorio nacional y son accesibles a través de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>. Aunado a lo anterior, se tienen datos mensuales de precipitación, temperatura mínima, media y máxima a nivel estatal, los cuales se encuentran disponibles en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.

De acuerdo con el SIAP [14], aproximadamente el 60.18 % de los municipios del estado de Michoacán son productores de aguacates; esto es, un total de 68 municipios destinan zonas de cultivo para la siembra y cosecha de aguacate, ver Figura 1. Como puede apreciarse en la Figura 1a, la participación de los municipios en la producción es desigual, lo cual puede atribuirse a diversos aspectos como la superficie destinada a los cultivos, disponibilidad de recursos, condiciones climáticas, entre otros factores.

Por otra parte, se sabe que en promedio un árbol alcanza una producción de hasta 200 kg y que una hectárea tiene la capacidad de albergar 280 árboles [31]. De esta manera, al estudiar el rendimiento de las zonas de cultivo, normalizando las toneladas de aguacates producidos respecto a las hectáreas cosechadas, se tiene otra alternativa para medir el impacto que tiene cada municipio dentro de los procesos productivos. Lo anterior se muestra en la Figura 1b y con esto podría ser posible caracterizar las variables agroclimáticas que, potencialmente, favorecen un mayor rendimiento por hectárea.

En la Figura 4, presentamos los registros meteorológicos históricos, desde 2012 hasta 2022, obtenidos de [36] para las estaciones Pedernales y El Varal, ubicadas en el municipio de Tacámbaro y Los Reyes, Michoacán, respectivamente. Por un lado, de acuerdo con la Figura 1a, Tacámbaro ocupa el cuarto lugar a nivel de producción; mientras que Los Reyes ocupa el octavo lugar. No obstante, al considerar el rendimiento por hectárea que se muestra en la Figura 1b, paradójicamente, se observa que Los Reyes y Tacámbaro se posicionan en el noveno y en el vigésimo primer lugar, respectivamente.

Para ilustrar lo anterior, en la Figura 2 se muestran los registros históricos desde el 1 de enero de 2018 al 31 de enero de 2025 para cultivos de riego y temporal que pertenecen a los municipios de Tacámbaro y Los Reyes, respectivamente.

Al considerar los datos anteriores, provenientes de [14], y en ausencia de la hipótesis de normalidad, la cual se verificó a través de una prueba Shapiro-Wilk ($p < 0.05$), la afirmación anterior sobre las diferencias de producción y rendimiento entre ambos municipios puede sustentarse estadísticamente a través de la implementación de pruebas U de Mann-Whitney.

Como puede apreciarse en la Figura 3, a nivel de producción, en efecto hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$) y el resultado es consistente con el análisis mencionado para la Figura 1a. Más aún, en la Figura 3 se observa que hay diferencias estadísticamente significativas respecto al rendimiento acumulado ($p < 0.05$), es decir, aquel que incorpora la producción acumulada mes tras mes y la pondera respecto a la superficie cosechada. Lo anterior es congruente con el análisis mencionado para la Figura 1b.

Por otra parte, para el rendimiento mensual, es decir, aquel que considera únicamente las toneladas producidas a lo largo de cada mes y las pondera respecto a la superficie cosechada de dicho mes, no hay evidencia de diferencias estadísticamente significativas. Esto podría indicar que a escalas de tiempo cortas, el rendimiento no es una medida tan relevante o informativa, pero a escalas de tiempo largas puede darnos indicios sobre las características que intervienen en los niveles de producción por hectárea.

Notemos que, derivado de su cercanía geográfica, los municipios productores del estado de Michoacán cuentan con similitudes en tanto a los recursos, las características agrometeorológicas y más propiedades biológicas. No obstante, fenómenos como la orografía o la actividad humana intervienen en enfatizar o diluir tales similitudes.

Por tanto, a manera de análisis exploratorio, estudiaremos el efecto de la duración en segundos del periodo luminoso diario, las precipitaciones diarias, la radiación solar de onda corta diaria, la temperatura máxima del aire, la temperatura mínima del aire y la presión del vapor de agua diaria sobre los niveles de producción y rendimiento del aguacate, tanto para el municipio de Tacámbaro como para el municipio de Los Reyes, ver Figura 4.

Estas variables influyen directamente en el proceso productivo del aguacate. La duración del

período de luz influye en el tiempo disponible para el crecimiento de la planta, mientras que la cantidad de lluvia regula la disponibilidad de agua, esencial tanto para la planta como para las reservas de agua en el suelo. La radiación solar de onda corta proporciona la energía necesaria para la fotosíntesis a la par de calentar los tejidos de la planta y el suelo [22], lo que a su vez afecta la actividad biológica y la disponibilidad de nutrientes.

Asimismo, las temperaturas máxima y mínima del aire inciden en la temperatura del suelo y, respecto a las plantas, intervienen en la floración y crecimiento [21]. La presión del vapor de agua, que está relacionada con la humedad en el aire, también impacta en la transpiración de la planta y en la retención de agua en el suelo.

Para complementar y formalizar el análisis visual que se desprende de la Figura 4, se ejecutaron pruebas U de Mann–Whitney para analizar, variable por variable, la presencia de diferencias estadísticas entre las condiciones meteorológicas de Tacámbaro y Los Reyes. Lo anterior, a consecuencia de la falta de la hipótesis de normalidad, la cual fue probada a través de la prueba Shapiro–Wilk ($p < 0.001$).

De las pruebas U de Mann–Whitney ejecutadas se concluye que hay diferencias estadísticamente significativas respecto a la radiación solar de onda corta ($p < 0.001$), temperatura máxima diaria del aire ($p < 0.001$), temperatura mínima diaria del aire ($p < 0.001$) y presión del vapor de agua ($p < 0.001$), ver Figura 5. Estas diferencias podrían explicar el hecho de que el municipio de Los Reyes posee un mayor rendimiento por hectárea en comparación con el municipio de Tacámbaro, pero para estudiarlo se requerirá de un análisis más exhaustivo.

Considerando tanto las características meteorológicas como los datos de producción que hemos analizado, ambas, de manera independiente. No obstante, ambas partes interactúan; por tanto, ahora estudiamos el efecto de tales características sobre los niveles de producción a través de medir la correlación entre ellas y su significancia estadística.

En consecuencia de la ausencia de la hipótesis de normalidad que se ha mencionado previamente, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, ρ , y su respectiva significancia estadística. La correlación de Spearman está definida para muestras de igual tamaño; por tanto, se calculó el promedio mensual de los datos meteorológicos dado que estos fueron registrados diariamente, desde el 1 de enero de 2012 hasta el 31 de diciembre de 2022; mientras que los datos de producción se registran con una frecuencia mensual, desde el 1 de enero de 2018 hasta el 31 de enero de 2025. Además, se consideró el periodo en donde ambos registros se intersecan en el tiempo; es decir, de enero de 2018 a diciembre de 2022.

Con el planteamiento anterior, para cada una de las variables de producción y rendimiento de aguacates se calculó su correlación de Spearman con las variables meteorológicas. Y para minimizar el riesgo de falsos positivos, se aplicó la corrección de Bonferroni, evitando así concluir erróneamente la existencia de una correlación estadísticamente significativa [13].

En la Figura 6 se presentan los resultados asociados a la producción mensual de aguacates. Respecto a Tacámbaro, la producción mensual tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con el periodo luminoso ($\rho = -0.49, p < 0.001$), la radiación solar de onda corta ($\rho = -0.51, p < 0.001$) y la temperatura máxima del aire ($\rho = -0.5, p < 0.001$), ver Figura 6a. Por otra parte, respecto a Los Reyes, la producción mensual tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con el periodo luminoso ($\rho = -0.42, p < 0.01$) y la temperatura mínima del aire ($\rho = -0.45, p < 0.01$), ver Figura 6b.

En la Figura 7 se muestran los resultados referentes a la producción acumulada de aguacates. Respecto a Tacámbaro, la producción acumulada tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con la radiación de onda corta ($\rho = -0.6, p < 0.001$) y una correlación positiva estadísticamente significativa con la presión del vapor de agua ($\rho = 0.69, p < 0.001$), ver Figura 7a. Similarmente, respecto a Los Reyes, la producción acumulada tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con la radiación de onda corta ($\rho = -0.53, p < 0.001$) y una correlación positiva estadísticamente significativa con la presión del vapor de agua ($\rho = 0.65, p < 0.001$), ver Figura 7b.

La Figura 8 ilustra las correlaciones referentes al rendimiento mensual por hectárea de aguacates. Respecto a Tacámbaro, el rendimiento mensual tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con el periodo luminoso ($\rho = -0.51, p < 0.001$), la radiación de onda corta ($\rho = -0.57, p < 0.001$) y con la temperatura máxima del aire ($\rho = -0.51, p < 0.001$), ver Figura 8a. Por otra parte, respecto a Los Reyes, el rendimiento mensual tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con el periodo luminoso ($\rho = -0.43, p < 0.01$) y la temperatura mínima del aire ($\rho = -0.46, p < 0.01$), ver Figura 8b.

Finalmente, en la Figura 9 se muestran las correlaciones referentes al rendimiento acumulado por hectárea de aguacates. Respecto a Tacámbaro, el rendimiento acumulado tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con la radiación de onda corta ($\rho = -0.65, p < 0.001$) y una correlación positiva estadísticamente significativa con la presión vapor de agua ($\rho = 0.71, p < 0.001$), ver Figura 9a. Por otra parte, respecto a Los Reyes, la conclusión es similar, puesto que el rendimiento acumulado tiene una correlación negativa estadísticamente significativa con la radiación de onda corta ($\rho = -0.65, p < 0.001$) y una correlación positiva estadísticamente significativa con la presión vapor de agua ($\rho = 0.73, p < 0.001$), ver Figura 9b.

Durante la exploración bibliográfica se observó un bajo número de trabajos enfocados en el pronóstico de eventos relacionados con la siembra, floración o cosecha. El trabajo de Salazar–García *et al.* (2018) [38], por ejemplo, emplea el concepto de días de frío acumulado, una herramienta similar a la empleada por Elnesr *et al.* [15, 16], para predecir el desarrollo de las estructuras anatómicas que dan paso a las flores del aguacate a través de considerar la temperatura máxima del aire y un modelo de regresión.

Por otra parte, Castaño–Robayo *et al.* (2022) [9] realiza un estudio comparativo de métodos

provenientes de machine learning para predecir la capacidad del suelo para retener e intercambiar nutrientes a las plantas de aguacate a través de analizar la capacidad de intercambio catiónico e identificar las variables edáficas que intervienen para implementarlas en modelos supervisados.

Además, Akin *et al.* (2017) [2] estudia series de tiempo sobre producción de aguacates en Turquía, desde 1988 a 2015, y caracteriza su comportamiento como series no estacionarias, con tendencia y no estacionalidad, por lo que propone la implementación del modelo de suavamiento exponencial de Brown como un método confiable para la predicción de la producción de aguacates.

Similarmente, el trabajo de Arizmendi-Peralta (2024) [3] también se centra en el pronóstico de producción de aguacates a partir de emplear datos recolectados por sensores ensamblados y programados por cuenta propia e instalados en una huerta del municipio de Huitzilac, Morelos. Con los datos recabados, implementa tanto algoritmos supervisados como no supervisados para generar las estimaciones.

Asimismo, en el trabajo de Mosquera *et al.* (2015) [26] se plantea un modelo de regresión cuadrática para analizar la producción de aguacates, a nivel de huerta y con árboles de misma edad, para detectar una baja en su rendimiento causada por la enfermedad de la marchitez del laurel, que es causada por un hongo, y proceder a retirar los árboles en cuestión.

Por otra parte, el proceso productivo no termina con la cosecha, sino que también incluye el almacenamiento. De esta manera, Pérez *et al.* (2004) [33] propone un modelo basado en la temperatura de los almacenes para estimar el tiempo que el aguacate perdurará hasta estar disponible en el mercado.

El resto de trabajos que fueron explorados durante la revisión bibliográfica centran su estudio en estimar la madurez del fruto, su calidad, detectar plagas e infecciones, densidad de flores y ventas. La mayoría de estos trabajos emplean análisis de imágenes satelitales, infrarrojas y radiografías, por lo que el costo computacional a gran escala puede resultar elevado.

De esta manera, este trabajo tiene como objetivo el desarrollo e implementación de herramientas, metodologías y algoritmos de aprendizaje automático con la finalidad de pronosticar la producción, temporadas de siembra, floración y cosecha en función del análisis de datos agroclimáticos históricos. De manera tal que sea posible tomar decisiones respecto al cuidado de cultivos; por ejemplo, al combinar los tipos de riego, proteger del calor y quemaduras por el sol a los tallos y ramas o cubrir las bases de los árboles para preservar la humedad, maximizando la supervivencia y producción, implicando un mayor flujo económico.

En conclusión, este trabajo pretende contribuir al fortalecimiento y desarrollo de la industria agrícola nacional e internacional mediante la aplicación de la ciencia de datos. La agricultura garantiza el abasto de alimentos y materia prima para diversos sectores productivos, y la

implementación de métodos actuales es capaz de minimizar los efectos del cambio climático, implicando mejoras en la seguridad alimentaria y la economía.

Objetivos

El proyecto aquí propuesto se ubica dentro de la línea de generación y aplicación del conocimiento de analítica de grandes cúmulos de información y pretende abordar la pregunta de investigación referente a cómo pueden utilizarse técnicas de aprendizaje automático, considerando información agroclimática, para predecir la evolución del proceso productivo del aguacate seccionándolo en las distintas etapas que lo componen. Esto, bajo la hipótesis de que, en efecto, es viable generar tales pronósticos.

De esta manera, emplearemos modelos de aprendizaje automático; por ejemplo, algoritmos de regresión, support vector machine, árboles de decisión o random forest, los cuales serán alimentados con datos agroclimáticos históricos para pronosticar las fechas más apropiadas para realizar el trasplante al suelo, la producción de flores y la producción de aguacates. Los anterior, tomando en consideración los objetivos que presentamos a continuación.

Objetivos generales.

1. Proponer un modelo de predicción, basado en aprendizaje automático, para determinar las fechas óptimas de trasplante de árboles de aguacate, la producción de flores y producción de aguacates en Michoacán, considerando variables climáticas y edáficas.
2. Contribuir en la toma de decisiones dentro del proceso productivo del aguacate analizando datos históricos y tendencias meteorológicas, en el estado de Michoacán, para reducir el impacto del cambio climático dentro de este proceso.

Objetivos particulares.

1. Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre modelos predictivos basados en técnicas de aprendizaje automático orientados hacia la industria agrícola, enfocándonos en aquellos trabajos que se han interesado en cultivos con características similares a las del aguacate.
2. Definir y depurar las bases de datos a utilizar, considerando registros históricos de clima, suelo y producción de aguacates en Michoacán.
3. Estudiar la participación de las variables disponibles y determinar cuáles tienen mayor peso y relevancia en cada una de las etapas del proceso productivo, desde el la siembra hasta la cosecha
4. Explorar y comparar diferentes técnicas de aprendizaje automático para determinar cuáles presentan mejor desempeño y exactitud como modelo predictivo.

5. Entrenar y validar el modelo predictivo desarrollado mediante pruebas con datos recientes para evaluar su precisión.
6. Publicar los resultados obtenidos a través de la elaboración de la tesis, la redacción de artículos científicos y presentaciones en congresos.

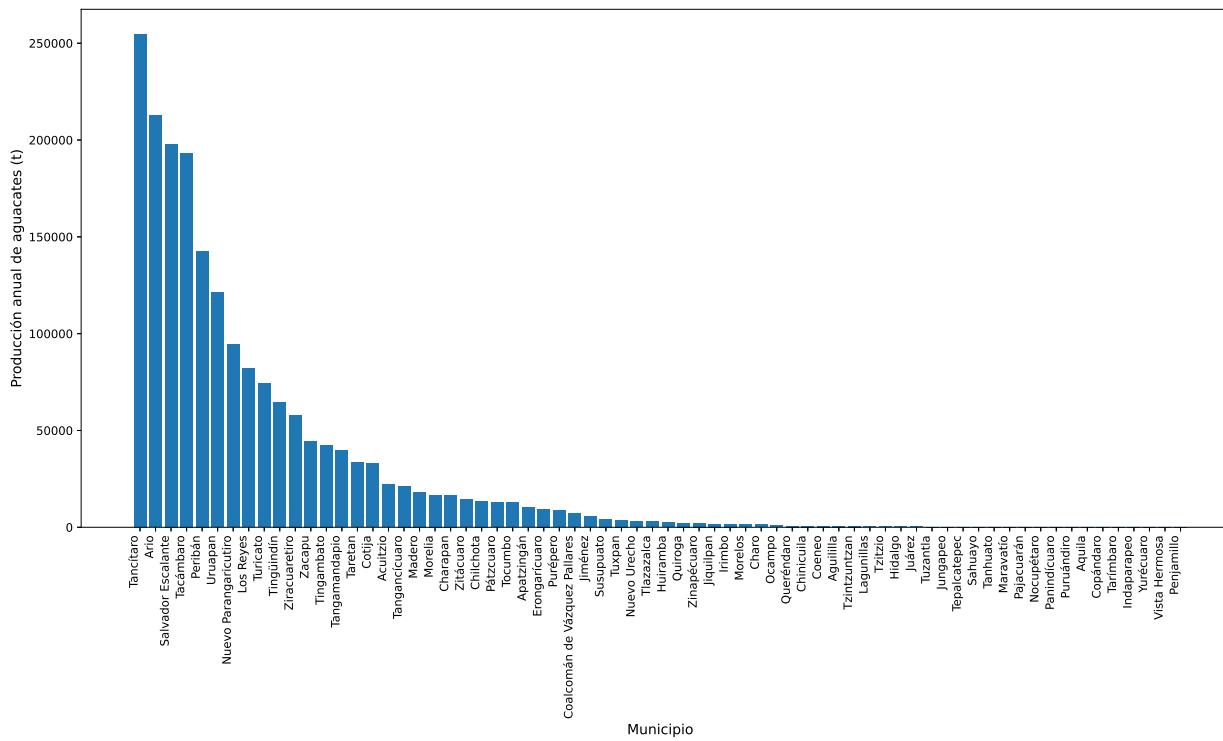
Cronograma de actividades

Para asegurar el desarrollo y la culminación exitosa del proyecto, se propone el siguiente cronograma, el cual se ha desglosado semestralmente. Lo anterior, para tomarlo como referencia a fin de garantizar un avance progresivo al apegarnos lo más posible a él y cubrir tanto los aspectos referentes al proyecto de investigación como los aspectos administrativos.

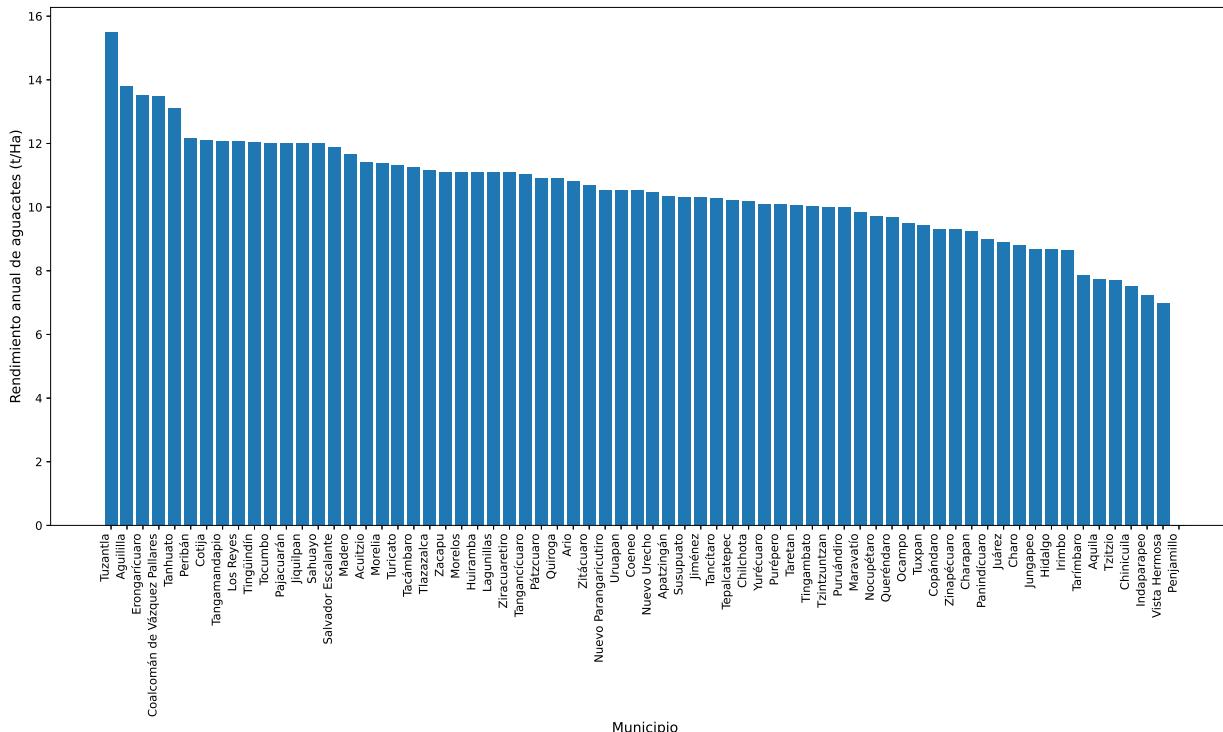
Semestre	Actividades
Agosto – Diciembre 2025	<ul style="list-style-type: none"> • Profundizar la revisión bibliográfica. • Definir y depurar el conjunto de datos con el que se trabajará a lo largo de proyecto. • Explorar técnicas de aprendizaje automático aplicadas a cultivos, tanto para aguacates como a algunos otros cultivos de características similares. • Elaborar una primera versión del protocolo de investigación.
Enero – Julio 2026	<ul style="list-style-type: none"> • Proponer, diseñar y revisar la metodología del modelo de predicción. • Implementar un análisis exploratorio con datos preliminares. • Presentar la versión final del protocolo de investigación ante el comité sinodal. • Comenzar con la escritura de la tesis.

Semestre	Actividades
Agosto – Diciembre 2026	<ul style="list-style-type: none"> • Entrenar modelos preliminares de predicción con diferentes técnicas. • Evaluar el desempeño de los modelos utilizando métricas estándar. • Comenzar con la escritura del primer artículo de investigación. • Presentar avances en un congreso nacional; por ejemplo, el Congreso Nacional de la Sociedad Matemática Mexicana, Congreso Nacional de Agricultura Sostenible u otros.
Enero – Julio 2027	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar el congreso internacional más adecuado para el envío del artículo. • Preparar una presentación oral o póster para dicho evento • Enviar el artículo que se desprenda del proyecto a un congreso internacional. • Fortalecer el proyecto a partir de buscar colaboraciones potenciales nacionales e internacionales.
Agosto – Diciembre 2027	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar actividades de retribución social para cumplir con los requisitos de la SECIHTI. • Consolidar los primeros capítulos de la tesis. • Definir las revistas de investigación, indexadas en el JCR y con un buen factor de impacto, en las cuales nuestro proyecto encajaría y destacaría.
Enero – Julio 2028	<ul style="list-style-type: none"> • Refinar y evaluar las metodologías para hacer ajustes considerando los resultados obtenidos y los alcances del proyecto. • Revisar y confirmar que el artículo a enviar cumple con el proceso editorial de la revista. • Enviar el primer artículo de investigación que se desprenda del proyecto a una revista indexada en el JCR.

Semestre	Actividades
Agosto – Diciembre 2028	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar comentarios de los revisores del artículo enviado para llevar a cabo las correcciones pertinentes en las rondas de revisiones que sean solicitadas. • Integrar las correcciones discutidas durante la revisión del artículo a los capítulos centrales de la tesis. • Revisar y releer los avances de la tesis para afinar detalles, evaluar el cumplimiento de los objetivos planteados y dar paso a la conclusión del trabajo.
Enero – Julio 2029	<ul style="list-style-type: none"> • Obtener la aceptación del artículo enviado a una revista indexada en el JCR. • Culminar la escritura de la tesis con el visto bueno por parte de la directora de tesis. • Enviar la tesis al comité sinodal para su revisión, corrección y posterior aprobación. • Solicitar la autorización de impresión de la tesis por parte de la biblioteca. • Aprobar el examen cerrado ante el comité sinodal para, posteriormente, realizar el examen de defensa de tesis para la obtención del grado académico.



(a) Producción anual 2024 por municipio.



(b) Rendimiento anual 2024 por municipio.

Figura 1: Reporte de producción y rendimiento anual de aguacates por municipio del 1 de enero al 31 de diciembre de 2024. Figura construida a partir de los datos disponibles en [14].

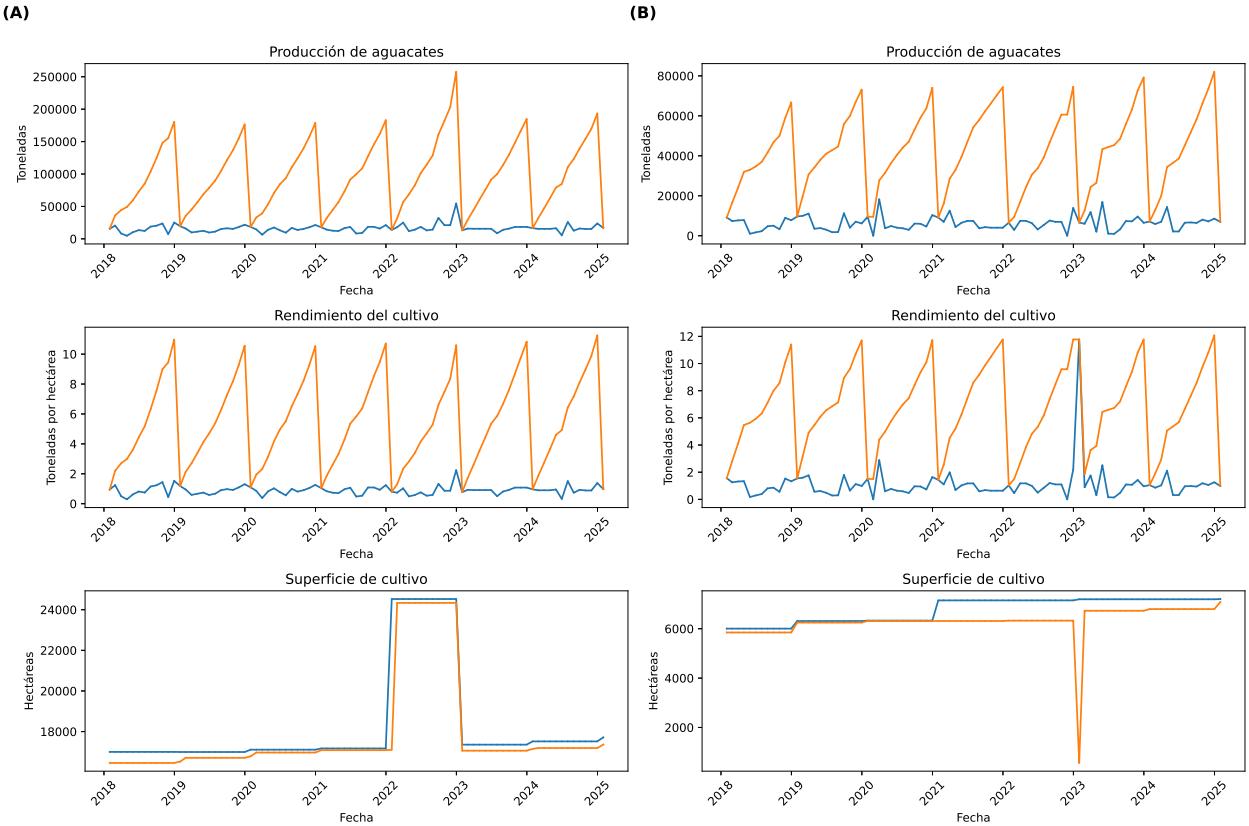


Figura 2: Comparación de producción y rendimiento mensual histórico desde enero de 2018 a enero de 2025 para los municipios de Tacámbaro y Los Reyes. La Figura (A) muestra los datos registrados para Tacámbaro; mientras que, la Figura (B) muestra los datos registrados para Los Reyes. Respecto a la producción de aguacates, en azul se muestra la producción mensual; mientras que, en naranja se ilustra la producción acumulada. Similarmente, respecto al rendimiento del cultivo, en azul se muestra el rendimiento mensual y en naranja el rendimiento acumulado. Por último, respecto a la superficie de cultivo, en azul se muestra el número de hectáreas sembradas; mientras que, en naranja se muestra el número de hectáreas cosechadas. Figura construida a partir de los datos disponibles en [14].

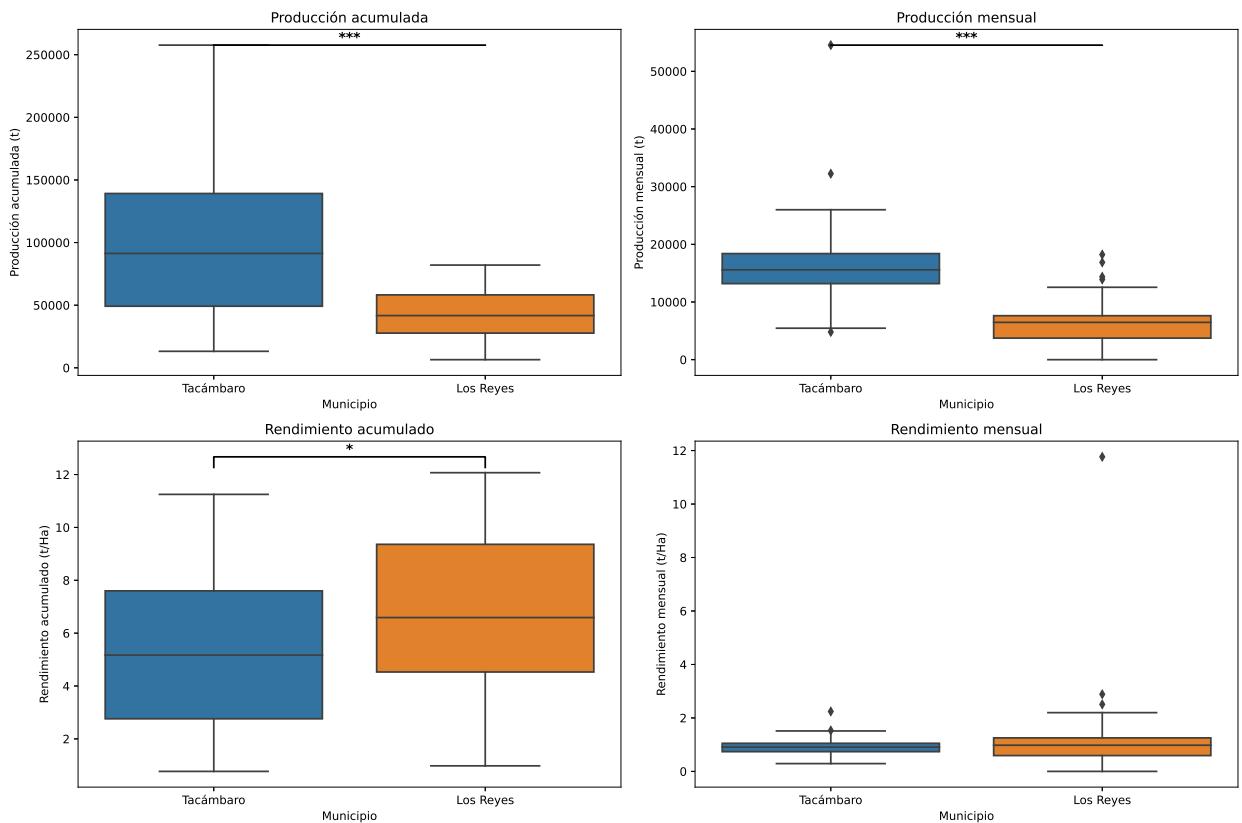


Figura 3: Comparación de producción acumulada, producción mensual, rendimiento acumulado y rendimiento mensual histórico desde enero de 2018 a enero de 2025 para los municipios de Tacámbaro (en azul) y Los Reyes (en naranja). Figura construida a partir de los datos disponibles en [14].

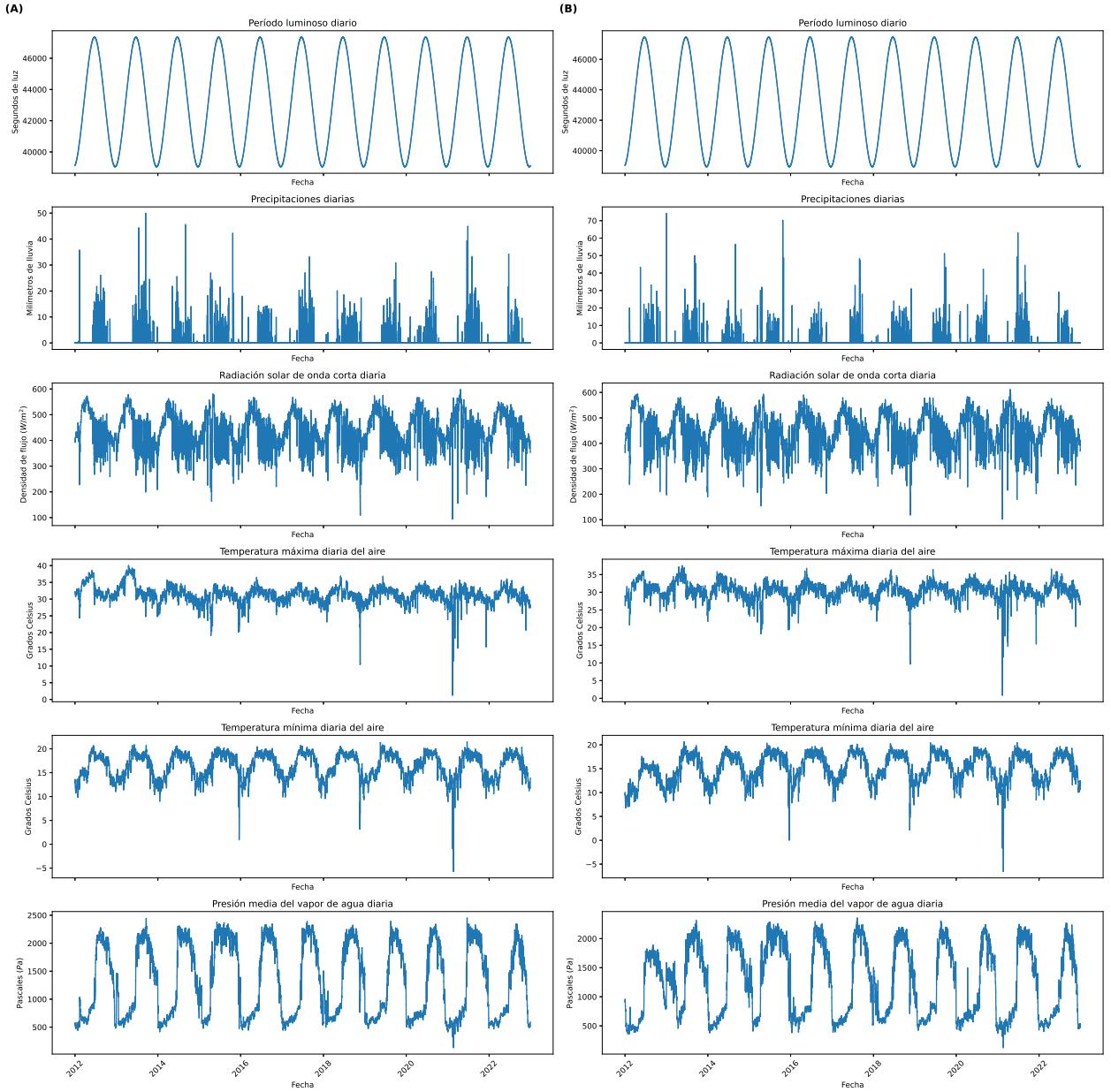


Figura 4: Comparación de características meteorológicas históricas desde 2012 a 2022. La Figura (A) muestra los registros de la estación Pedernales de Tacámbaro, Michoacán; mientras que, la Figura (B) muestra los registros de la estación El Varal de Los Reyes, Michoacán. Figura construida a partir de los datos disponibles en [36].

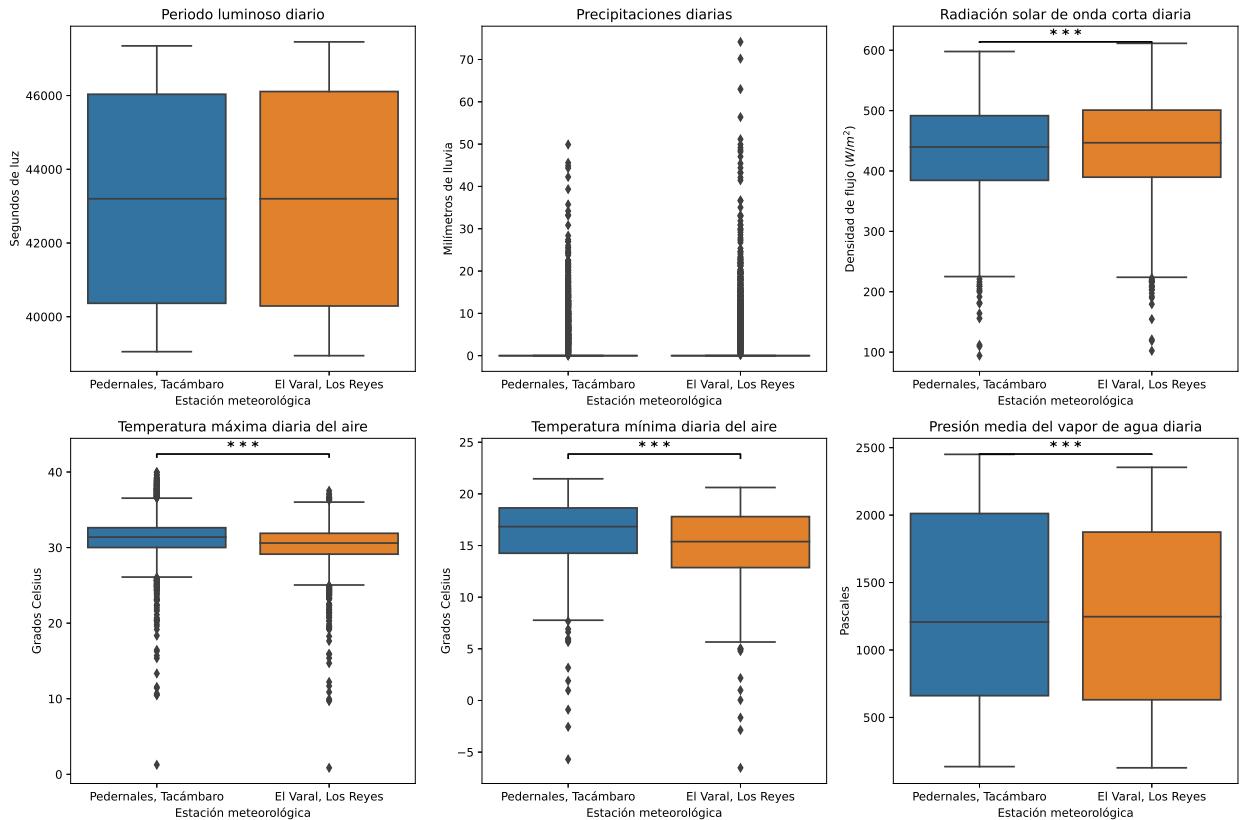
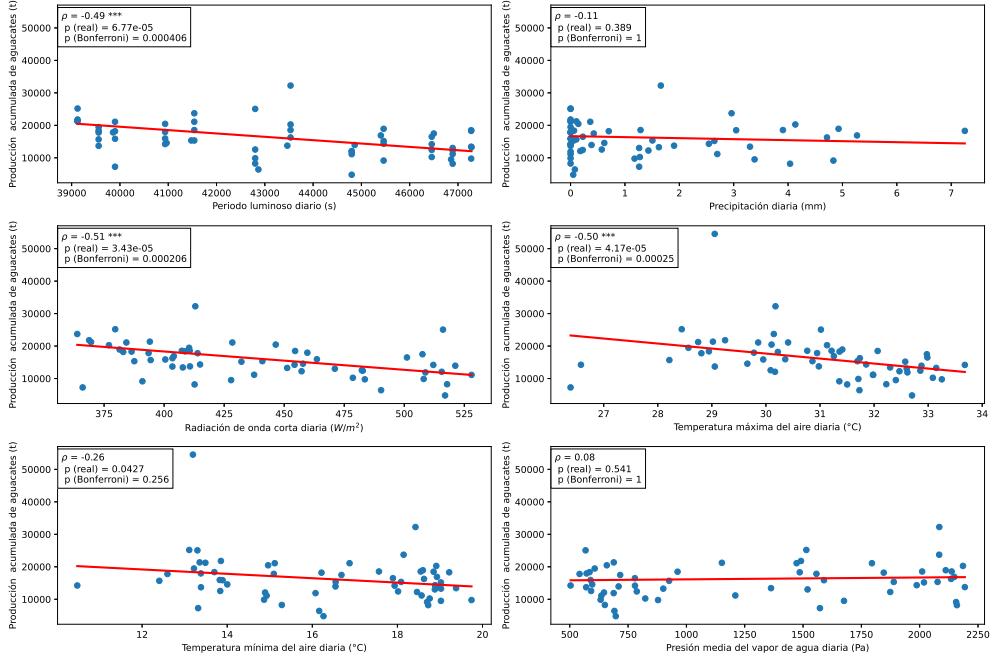
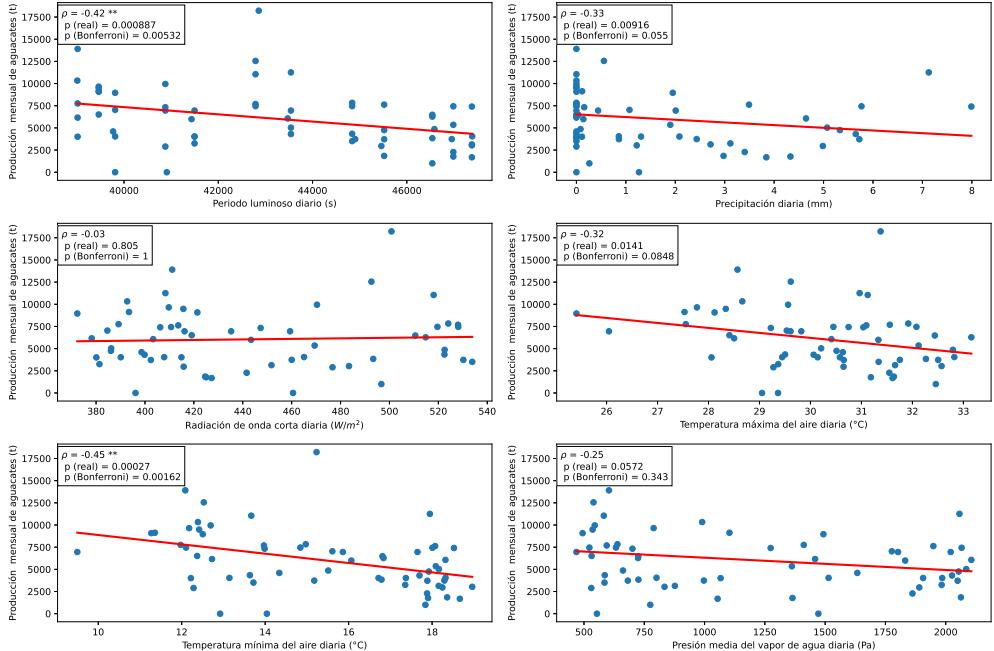


Figura 5: Comparaciones estadísticas entre las características meteorológicas históricas desde 2012 a 2022. En azul se muestran los datos registrados por la estación Pedernales de Tacámbaro, Michoacán; mientras que, en naranja se muestra los registros de la estación El Varal de Los Reyes, Michoacán. Se aplicaron pruebas U de Mann–Whitney y la significancia estadística se denota a través de * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Figura construida a partir de los datos disponibles en [36].

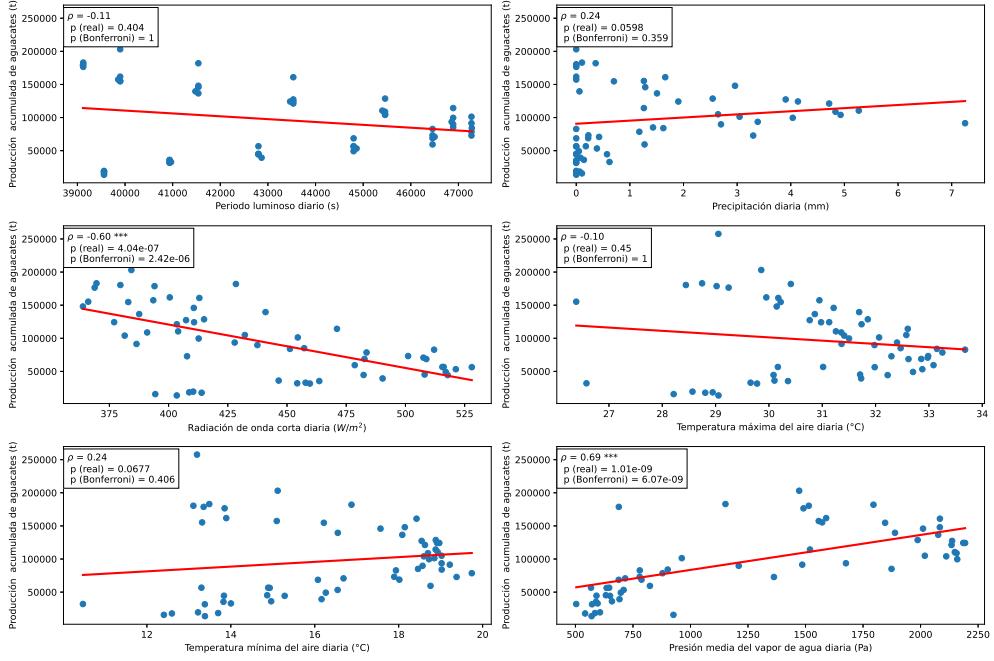


(a) Tacámbaro

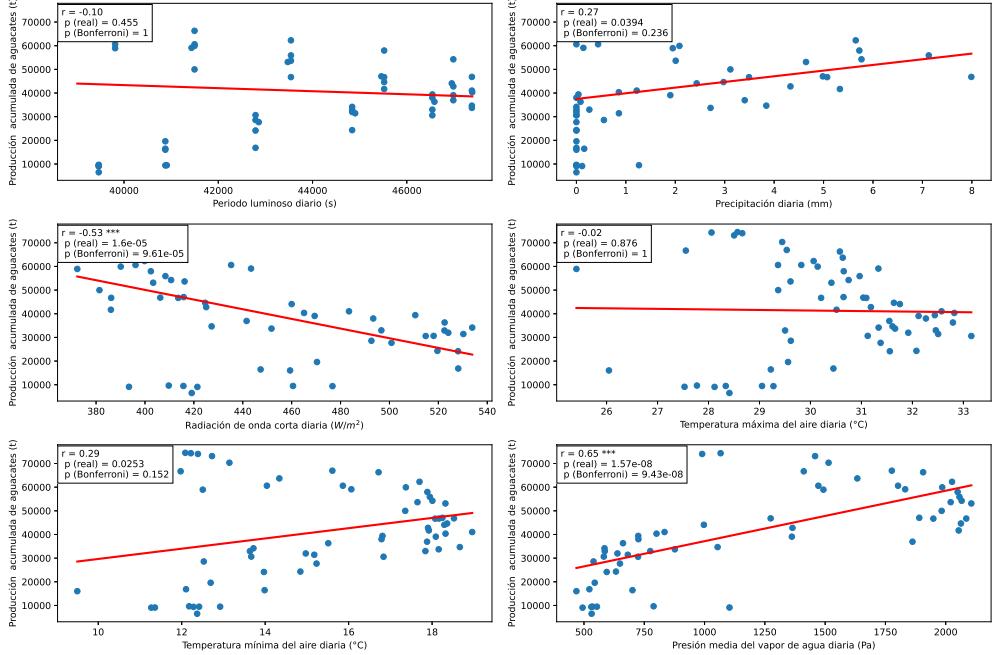


(b) Los Reyes

Figura 6: Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y la producción mensual de aguacates. La Figura 6a ilustra los resultados obtenidos para Tacámbaro; mientras que, la Figura 6b muestra lo obtenido para Los Reyes. Se aplicaron correlaciones de Spearman con corrección de Bonferroni y su significancia estadística se denota a través de * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Figura construida a partir de los datos disponibles en [14] y [36].

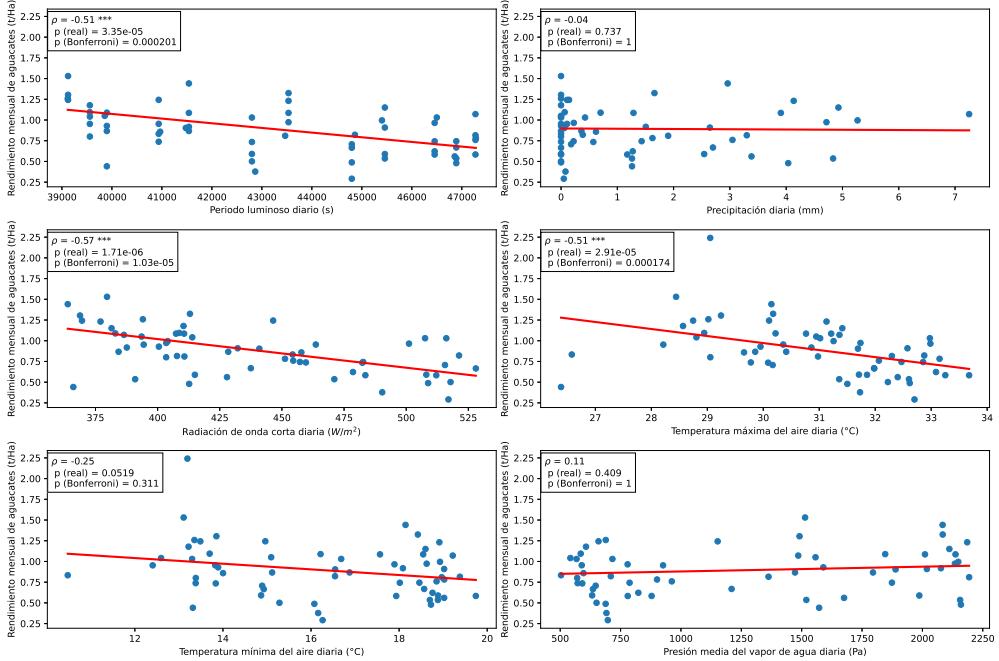


(a) Tacámbaro

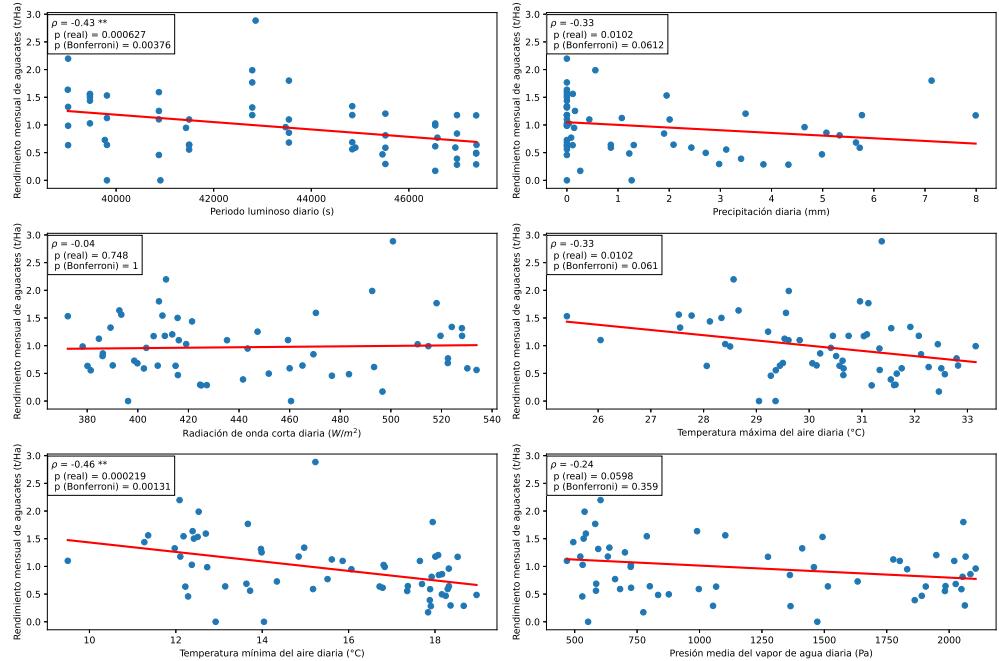


(b) Los Reyes

Figura 7: Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y la producción acumulada de aguacates. La Figura 7a ilustra los resultados obtenidos para Tacámbaro; mientras que, la Figura 7b muestra lo obtenido para Los Reyes. Se aplicaron correlaciones de Spearman con corrección de Bonferroni y su significancia estadística se denota a través de * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Figura construida a partir de los datos disponibles en [14] y [36].

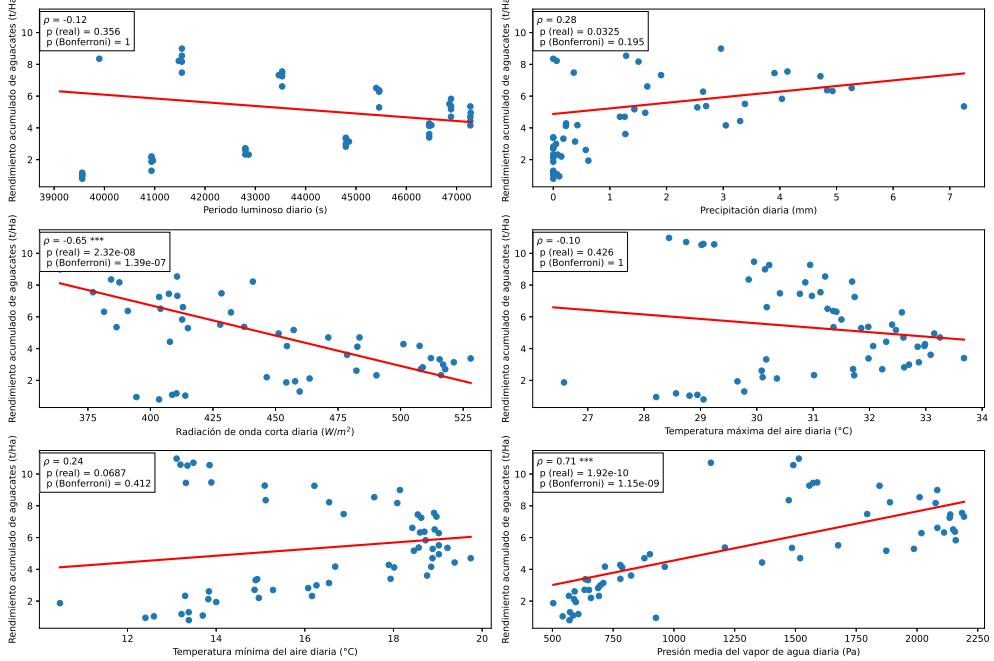


(a) Tacámbaro

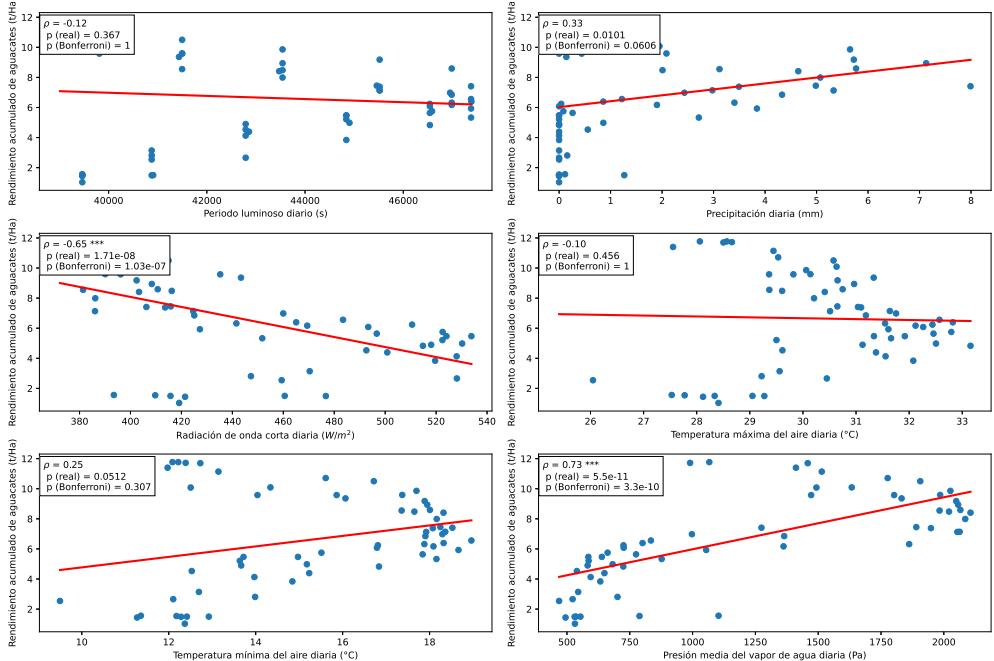


(b) Los Reyes

Figura 8: Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y el rendimiento mensual de aguacates. La Figura 7a ilustra los resultados obtenidos para Tacámbaro; mientras que, la Figura 7b muestra lo obtenido para Los Reyes. Se aplicaron correlaciones de Spearman con corrección de Bonferroni y su significancia estadística se denota a través de * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Figura construida a partir de los datos disponibles en [14] y [36].



(a) Tacámbaro



(b) Los Reyes

Figura 9: Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y el rendimiento acumulado de aguacates. La Figura 9a ilustra los resultados obtenidos para Tacámbaro; mientras que, la Figura 9b muestra lo obtenido para Los Reyes. Se aplicaron correlaciones de Spearman con corrección de Bonferroni y su significancia estadística se denota a través de * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.01$) y *** ($p < 0.001$). Figura construida a partir de los datos disponibles en [14] y [36].

Referencias

- [1] A. Acosta-Rangel, R. Li, P. Mauk, L. Santiago, and C.J. Lovatt. Effects of temperature, soil moisture and light intensity on the temporal pattern of floral gene expression and flowering of avocado buds (*persea americana* cv. hass). *Scientia Horticulturae*, 280:109940, 2021.
- [2] M. Akin and S.P. Eydurhan. Predicting Avocado Production in Turkey for 2016-2025 Period Using Time Series Analysis. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 27(2):252–258, June 2017.
- [3] P.P. Arizmendi Peralta. Estudio de técnicas de Machine Learning para estimar la producción de aguacate en la zona norte del estado de Morelos. 2024.
- [4] G. Bayable, G. Amare, G. Alemu, and T. Gashaw. Spatiotemporal variability and trends of rainfall and its association with pacific ocean sea surface temperature in west harerge zone, eastern ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10:1–21, 2021.
- [5] J.S. Boyer. Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571):443–448, 1982.
- [6] R. Callejas-Rodríguez, R. Reyes-Sánchez, I. Plácido-Tomielis, and H. Flores-Gallardo. Métodos de evaluación de tiempo térmico para determinar fecha de plantación de papa para la agroindustria. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(2):127, June 2023.
- [7] C. Campos-Rojas, J. Ayala-Arreola, J. Andrés-Agustín, and M.C. Espíndola-Barquera. *Propagación de aguacate*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2012.
- [8] L. Cassani and A. Gomez-Zavaglia. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. *Frontiers in Nutrition*, 9, February 2022.
- [9] M.H. Castaño Robayo and J.J. González Veloza. Predicción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en cultivos de aguacate empleando modelos Machine Learning. 2022.
- [10] C. S. Chen. Digital computer simulation of heat units and their use for predicting plant maturity. *International Journal of Biometeorology*, 17(4):329–335, December 1973.
- [11] D.C. Close, C.L. Beadle, and P.H. Brown. The physiological basis of containerised tree seedling 'transplant shock': a review. *Australian Forestry*, 68(2):112–120, 2005.
- [12] E. Cuevas, J. Blancas, J. Caballero, I. A Hinojosa-Díaz, and A. Martínez-Ballesté. Agricultural management and local knowledge: key factors for the conservation of socio-ecosystems in the face of the pollinator world crisis. *Botanical Sciences*, 99(2):305–320, 2021.

- [13] F. Curtin and P. Schulz. Multiple correlations and Bonferroni's correction. *Biological Psychiatry*, 44(8):775–777, October 1998.
- [14] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de siembras y cosechas, 2025. Accessado en marzo 1 de 2025 en http://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/.
- [15] M.N. Elnesr and A.A. Alazba. An integral model to calculate the growing degree-days and heat units, a spreadsheet application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124:37–45, 2016.
- [16] M.N. Elnesr, A.A. Alazba, and A.A. Alsadon. An arithmetic method to determine the most suitable planting dates for vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90:131–143, 2013.
- [17] M.S. Farooq, M. Uzair, A. Raza, M. Habib, Y. Xu, M. Yousuf, S.H. Yang, and M. Ramzan Khan. Uncovering the research gaps to alleviate the negative impacts of climate change on food security: a review. *Frontiers in plant science*, 13:927535, 2022.
- [18] G. Fischer, J.O. Orduz-Rodríguez, and C.V. Talamini-Do Amarante. Sunburn disorder in tropical and subtropical fruits. a review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(3), 2022.
- [19] H. Flores-Gallardo, W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz, and E. Sifuentes-Ibarra. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*, 30(1):59–67, 2012.
- [20] D.E. Haskell, D.J. Flaspohler, C.R. Webster, and M.W. Meyer. Variation in soil temperature, moisture, and plant growth with the addition of downed woody material on lakeshore restoration sites. *Restoration Ecology*, 20(1):113–121, 2012.
- [21] S.B. Idso, B.A. Kimball, M.G. Anderson, and J.R. Mauney. Effects of atmospheric co₂ enrichment on plant growth: the interactive role of air temperature. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 20(1):1–10, 1987.
- [22] S.V.K. Jagadish, D.A. Way, and T.D. Sharkey. Plant heat stress: Concepts directing future research. *Plant, cell & environment*, 44(7):1992–2005, 2021.
- [23] D.E. Mainhart, B.O. Christoffersen, R.A. Thompson, C.M. Reemts, and A. Fierro-Cabo. Preparing for the worst: Enhancing seedling traits to reduce transplant shock in semi-arid regions. *Forests*, 15(9):1607, 2024.
- [24] S. Materia, L. García Palma, C. van Straaten, S. O, A. Mamalakis, L. Cavicchia, D. Coumou, P. de Luca, M. Kretschmer, and M. Donat. Artificial intelligence for climate prediction of extremes: State of the art, challenges, and future perspectives. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(6):e914, 2024.

- [25] A.F Moraes García, L. Micheletti Broglio, M. Santoro Brossi, N. Teixeira dos Santos, T. Avilés Cantuarias, and S. da Silva Rodrigues. Horticultural performance of 'hass' avocado grafted onto seedling and clonal rootstocks under tropical wet-dry climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 302:111155, August 2022.
- [26] M. Mosquera, E.A. Evans, and R. Ploetz. Assessing the profitability of avocado production in South Florida in the presence of Laurel Wilt. *Theoretical Economics Letters*, 5(2):343–356, 2015.
- [27] S. Narayan, R.H. Kanth, R. Narayan, F.A. Khan, A. Saxena, and T. Hussain. Effect of planting dates and integrated nutrient management on productivity and profitability of potato (*Solanum tuberosum*) in Kashmir valley. *Indian Journal of Agronomy*, 59(1):116–121, 2014.
- [28] P. Olschewski, M.D.B. Dieng, H. Moutahir, B. Böker, E. Haas, H. Kunstmann, and P. Laux. Amplified potential for vegetation stress under climate-change-induced intensifying compound extreme events in the greater mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(4):1099–1134, April 2024.
- [29] R. Parajuli, G. Thoma, and M.D. Matlock. Environmental sustainability of fruit and vegetable production supply chains in the face of climate change: A review. *Science of The Total Environment*, 650:2863–2879, 2019.
- [30] B. Park, Y. Kim, S. Min, and E. Lim. Anthropogenic and natural contributions to the lengthening of the summer season in the northern hemisphere. *Journal of Climate*, 31(17):6803 – 6819, 2018.
- [31] L.S. Peña Urquiza, S. Rebollar Rebollar, N. Callejas Juárez, J. Hernández Martínez, and G Gómez Tenorio. Análisis de viabilidad económica para la producción comercial de aguacate Hass. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36:1325–1338, 2015.
- [32] A. Premkumar, A. Barceló-Muñoz, F. Pliego-Alfaro, M.A. Quesada, and J.A. Mercado. Influences of exogenous sucrose on juvenile avocado during in vitro cultivation and subsequent ex vitro acclimatization. *Trees*, 16(8):569–575, August 2002.
- [33] K. Pérez, J. Mercado, and H. Soto-Valdez. Note. effect of storage temperature on the shelf life of hass avocado (*persea americana*). *Food Science and Technology International*, 10(2):73–77, 2004.
- [34] A. Raza, A. Razzaq, S.S. Mehmood, X. Zou, X. Zhang, Y. Lv, and J. Xu. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 2019.
- [35] J.L. Rocha-Arroyo, S. Salazar-García, A.E. Bárcenas-Ortega, I.J.L. González-Durán, and L.E. Cossio-Vargas. Fenología del aguacate "Hass" en Michoacán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(3):303–316, 2011.

- [36] V.M. Rodríguez-Moreno. Sistema de base de datos meteorológicos. *X Congreso Nacional sobre conservación y utilización de los recursos zoogenéticos, XXII Simposio Iberoamericano y X Congreso Nacional CONBIAND*, 2021. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla de Zaragoza, México: INIFAP. RP-DA INIFAP-03-2021-120109052200-01. Disponible en: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/DatosIndirectos/NEssenger>.
- [37] F.M. Roka, M. Ozores-Hampton, and G. McAvoy. Estimating financial losses to vegetable producers and farmworkers from a freeze event. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, volume 123, pages 134–137, 2010.
- [38] S. Salazar-García, M.E. Ibarra-Estrada, A. Álvarez Bravo, and J. González-Valdivia. Modelos de predicción del desarrollo floral del aguacate ‘méndez’. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1):151–161, 2018.
- [39] S. Salazar-García, E.M. Lord, and C.J. Lovatt. Inflorescence development of the ‘hass’ avocado: commitment to flowering. *American Society for Horticultural Science*, 124:478–482, 1999.
- [40] D. Salinas Vargas, A. Cruz Mendivil, A.Y. Peraza Magallanes, B. Valenzuela Leal, C.L. Calderón Vázquez, E. Sandoval Castro, J.C. Martínez Alvarez, J.E. Cuadras Camacho, J.L. Romero Romero, M. Castro López, and M.A. Magallanes Tapia. *Manual para el Establecimiento del Cultivo de Aguacate en la Zona Centro Norte de Sinaloa*. Consejo para el Desarrollo Económico de Sinaloa, 2021. Accesado en febrero 1 de 2025 en https://codesin.mx/file/4/128_Manual%20del%20Aguacate%20-2017%2011%202021%20.pdf_1637099646.pdf.
- [41] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Aguacate mexicano. In *Planeación Agrícola 2017–2030*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017. Accesado en enero 31 de 2025 en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257067/Potencial-Aguacate.pdf>.
- [42] E. Surówka, M. Rapacz, and F. Janowiak. *Climate Change Influences the Interactive Effects of Simultaneous Impact of Abiotic and Biotic Stresses on Plants*, pages 1–50. Springer Singapore, Singapore, 2020.
- [43] K.E. Trenberth. What are the seasons? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64(11):1276 – 1282, 1983.
- [44] J. Wang, Y. Guan, L. Wu, X. Guan, W. Cai, J. Huang, W. Dong, and B. Zhang. Changing lengths of the four seasons by global warming. *Geophysical Research Letters*, 48(6):e2020GL091753, 2021. e2020GL091753 2020GL091753.