

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 [19]. 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 [72].

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 [99]. 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 [103], tanto por factores naturales como por factores ligados a la actividad humana [73].

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 [11, 27, 72].

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 [35].

Cada cultivo prospera dentro de umbrales ambientales específicos, que en muchos casos, han sido ya previamente descritos; e.g., el aguacate [64, 81]. 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 [90]. La transición entre ambas, particularmente las cuatro semanas posteriores del cultivo en campo [76], determina en gran medida el éxito del árbol a largo plazo.

De acuerdo con Campos-Rojas *et al.* (2012) [16], 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 [90], 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) [86] 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 [24, 61]. Por tanto, este fenómeno puede provocar la pérdida de plantas, afectando la producción, exportación y rentabilidad del cultivo [83].

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) [85], 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 [3].

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 [36]. 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 [45]. 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 [86].

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [90], 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 [86].

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 [74]. 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 [66].

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 abióticos, bióticos y socioeconómicos.

El impacto del cambio climático ha sido profundamente significativo; en particular, la agricultura se considera la actividad más amenazada por este fenómeno [12, 80]. 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 [71, 80, 95]. 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 abióticos

Estrés climático

Estrés agroambiental

Desplazamiento de climas

Desfase de estaciones y fenología

Factores bióticos

Plagas por insectos

Desde sus orígenes [67], la agricultura ha considerado la presencia de insectos, tanto para preservar y aprovechar a aquellos que resultan benéficos como para contener y evitar a los que se convierten en plaga [42, 52]. La producción agrícola y las comunidades de insectos requieren mantener un equilibrio para prosperar mutuamente [67].

Los cambios en la temperatura global han modificado las dinámicas poblacionales de los insectos, desde su distribución geográfica hasta su mortalidad [55]. Esto ha generado un desbalance entre cultivos huésped e insectos, además de alterar la relación con sus enemigos naturales [93, 96].

La resiliencia de los ecosistemas puede mantener la estabilidad agrícola frente a perturbaciones ambientales ocasionadas por eventos extremos breves y esporádicos, como ondas de calor o sequías [9]. Sin embargo, cuando estas condiciones se vuelven permanentes, la resiliencia se ve superada por lo que los ecosistemas transicionan hacia nuevos estados de manera irreversible [38].

El aumento sostenido de la temperatura ha favorecido la movilización de especies, lo que a su vez implica la introducción de insectos invasores [110]. Lo anterior induce una competencia biológica en donde puede que los insectos invasores sean erradicados, erradiquen a los organismos locales o comiencen a cohabitar [104].

Si los nativos prevalecen, la estabilidad del ecosistema local se mantiene; en otro caso, la vegetación corre el riesgo de ser plagada por las especies introducidas. Por ejemplo, en NorTEAMÉRICA, alrededor del 40 % de las plagas de insectos más relevantes corresponde a especies invasoras [69].

Lo anterior se ha atribuido a que el aumento de las temperaturas y los cambios en la duración de las estaciones del año, de manera conjunta, han prolongado la duración de la época reproductiva, reducido la mortalidad por el invierno y adelantado la fecha cuando emergen los insectos en la primavera [55]. Por tanto, el número de generaciones anuales de insectos se ha visto favorecido [44], generando poblaciones cada vez más grandes.

Del total de especies de insectos, solo el 3 % se consideran plagas de interés agrícola debido a su capacidad de colonización y rápida reproducción [41]. No obstante, se proyecta que conforme aumenten las temperaturas también crezca el número de especies con relevancia agrícola, lo que implica mayores daños para la industria [32].

Debilitamiento de la polinización

La polinización se refiere, de manera conjunta, a todos aquellos procesos de regulación que intervienen en la recolección, transferencia y deposición de granos de polen en las flores [59]. De igual manera, se contemplan aspectos como la frecuencia de tales eventos, los agentes que los llevan a cabo, los métodos a través de los cuales ocurren y la cobertura geográfica [18, 107].

Los agentes polinizadores, en la naturaleza, incluyen a los insectos, las aves, mamíferos, el viento y el agua [5]. La polinización zoógama, es decir, aquella en donde interviene la presencia e interacción de algún animal, destaca del resto pues se estima que más del 75 % de las flores en el mundo dependen de ella para mantener las poblaciones de plantas existentes [70].

La polinización anemófila, aquella que se lleva a cabo a través del viento, es considerada como la segunda fuente más importante dado que su aportación en la preservación de las plantas supera el 10 % [40]. Más aún, respecto a cultivos para consumo, las anteriores formas se consideran como las únicas alternativas dado que la polinización hidrófila está presente en un reducido número de especies de plantas exclusivamente, no abundantes y sin interés en términos alimentarios para los humanos [23].

Respecto a los polinizadores animales, el panorama es similar a lo discutido previamente referente a las plagas por insectos en tanto a la migración. En general, se ha observado la

pérdida de hábitats de polinizadores [63], la cual ha implicado la migración y la redistribución geográfica de numerosas especies [57, 91, 78], derivado por la elevación en temperaturas, la disponibilidad de recursos y cambios en las relaciones bióticas.

Adicionalmente, respecto a los insectos se ha reportado una reducción en su longevidad a consecuencia de alteraciones químicas en el néctar de las flores y en las concentraciones proteicas del polen [47, 111]. Tales cambios se desencadenan en ambientes con altas concentraciones de CO₂ y pocas precipitaciones [78].

Además, las sequías reducen el tamaño floral y la intensidad de colores [13, 78], volviéndolas menos visibles o llamativas para los polinizadores. De igual forma, los cultivos pueden verse afectados en aspectos genéticos puesto que la dispersión de semillas por parte de las aves se reduce [7].

Respecto a los mamíferos, estos son responsables de polinizar plantas de difícil acceso para insectos y aves [17]. De ellos destacan principalmente los murciélagos quienes llevan a cabo la polinización de plantas cuyas flores están disponibles en períodos sin luz solar, como el agave [98].

Por otra parte, la polinización anemófila es afectada directamente por cambios en la dirección, velocidad, humedad y temperatura del viento [26]. En consecuencia, tales condiciones modifican la humedad en el polen, reduciendo su viabilidad cuando está faltó de humedad y dificultando su motilidad al estar húmedo en exceso [39].

Adicionalmente, si el viento transporta al polen por más de dos horas, este puede dejarlo inviable por el secado o por el aislamiento causado por haber sido depositado fuera de un área de cultivo [60]. El caso de la polinización hidrófila resulta similar, dado que las corrientes pueden reducir la fertilidad y depositarlo en sitios sin relevancia reproductiva [2].

La polinización tiene un papel crucial en la supervivencia, prevalencia y variabilidad genética en las plantas [54]. Más aún, para fines de consumo, es también fundamental para la cosecha de productos y semillas de buena calidad, tanto en sabor como en tamaño [5], lo cual repercute más notablemente en los cultivos perennes por el tiempo que se mantienen en el campo [78].

Salud de los cultivos

Similar a lo que ocurre en los seres humanos, los cultivos se encuentran expuestos a diversos organismos patógenos que pueden comprometer su salud [89]. Estas enfermedades pueden adquirirse tanto a través de los órganos subterráneos [53] como en los órganos que yacen al aire libre [10], y de acuerdo con su patrón epidémico y sus consecuencias se clasifican en crónicas, agudas o emergentes [88].

Las enfermedades crónicas son aquellas que ocurren regularmente en cada temporada y afectan amplias extensiones de cultivo [108]. En contraste, las enfermedades agudas aparecen de manera irregular tanto en el tiempo como en el espacio [89, 108]. Finalmente, las enfermedades emergentes son aquellas que se encuentran en proceso de expansión, ya sea en su distribución geográfica o en la gama de especies que logran infectar [6].

Los agentes responsables de fitoenfermedades incluyen a los hongos, virus, bacterias y nemátodos [87]. El tamaño y localización de sus poblaciones se ha modificado en consecuencia del cambio climático generando una tendencia a que más enfermedades sean consideradas como emergentes, el reporte de nuevas enfermedades y mayor virulencia [58].

Lo anterior no solo repercute directamente en la agricultura, sino que pone en riesgo la integridad ecológica del ecosistema, en general [58]. Por tanto, la estabilidad de los microbiomas del suelo y la superficie se ve comprometida rápidamente, afectando su prevalencia a largo plazo [51], al reducir la diversidad microbiana, alterar la descomposición de materia orgánica y la retención de nutrientes [49].

De esta manera, los daños ocasionados por patógenos, como la aceleración del secado de las hojas, la reducción de la fotosíntesis o la pérdida de firmeza de los tejidos vegetales, se presentan con mayor frecuencia [89]. Además, la simultánea disminución de los microorganismos benéficos, que ciclan nutrientes y mitigan patógenos, favorece un desequilibrio agrícola que pone en riesgo la salud de los cultivos [51].

Competencia entre plantas

En las secciones previas hemos explorado las relaciones biológicas entre los cultivos y diversos organismos; sin embargo, el cambio climático también ha transformado las interacciones que ocurren entre las propias especies vegetales [43]. En esta sección nos enfocaremos en analizar las dinámicas de competencia que los cultivos establecen con la maleza, las plantas parásitarias, los cultivos introducidos y aquellos generados mediante organismos genéticamente modificados.

En términos generales, la maleza agrupa a todas aquellas plantas en un sistema agrícola que crecen de manera no deseada dado que poseen mecanismos de dispersión adaptables y eficientes [79]. A nivel nutricional, la maleza se comporta de manera similar a los cultivos; no obstante, por cuestiones genéticas, su agresividad y capacidad de expansión biogeográfica pueden verse favorecidas por el alza en las concentraciones de CO₂, las altas temperaturas y el estrés hídrico [100].

Lo anterior implica que la maleza, como competencia para los cultivos, posee habilidades de adaptación y una fuerte capacidad de capturar los recursos disponibles [79]. En contraste, respecto a las plantas parásitarias también se ha reportado una ampliación tanto geográfica

como en la gama de especies hospederas [109].

En el caso de las plantas parásitas, estas no compiten directamente por los recursos, sino que los extraen de manera indirecta de la planta hospedera [105]. Lo anterior provoca un reajuste en la distribución de la energía reservada por la planta, lo que conlleva a un aumento de la transpiración en el hospedero, frecuentemente asociado a un enfriamiento de sus tejidos [75].

Este fenómeno reduce la producción de flores y frutos [105], pero puede implicar consecuencias fatales. En zonas donde, a consecuencia del cambio climático, los recursos hídricos han incrementado, este efecto genera condiciones de alta humedad que favorecen el desarrollo de co-infecciones por patógenos [1]. Mientras que en zonas con escasez de agua, el incremento en la transpiración puede resultar mortal tanto para la planta parásita como para el hospedero [105].

Por tanto, la presencia tanto de maleza como de plantas parasitarias es indeseable, desde un punto de vista económico y productivo. Desde esta perspectiva, también destaca la introducción de cultivos no nativos y aquellos generados mediante organismos genéticamente modificados, los cuales se abordan a continuación.

En un sistema agrícola, los cultivos no nativos pueden ser introducidos de manera natural, al aprovechar oportunidades de colonización; de manera artificial, por decisión humana; o mediante una combinación de ambas estrategias [106]. En cualquiera de los casos, esto afecta directamente a la biodiversidad local y la sinergia del ecosistema [92].

La introducción de especies ocurre principalmente por los cambios en el ambiente [14]. En cuanto a la introducción natural, esta ocurre debido a que las especies han hallado condiciones más favorables para su desarrollo [92]. Mientras que la introducción artificial se lleva a cabo, principalmente, por cuestiones productivas y su rentabilidad comercial [46].

En tierras de cultivo, mayoritariamente, la introducción de especies se realiza de manera artificial [94]; mientras que en cultivos acuáticos, la introducción de especies vegetales se realiza principalmente de manera natural [92]. No obstante, la sustitución de cultivos nativos por especies no nativas ha ido en aumento; e.g., en Europa se estima que el 40 % de las especies nativas serán sustituidas para el año 2080 [97].

A diferencia de los cultivos no nativos, cuya introducción puede ser natural o artificial, los cultivos genéticamente modificados dependen exclusivamente de la intervención humana. En este caso, las compañías fabricantes diseñan y editan las semillas con el fin de obtener cultivos resistentes a condiciones ambientales adversas, plagas y enfermedades [102] a la par de asegurar una alta producción de calidad nutrimental y comercial [22].

Por otra parte, al consumir los productos resultantes la edición genética, potencialmente pueden presentarse nuevas reacciones alérgicas impredecibles y alteraciones en los sistemas

digestivo e inmunológico [102]. Adicionalmente, este tipo de cultivos suele incorporar tecnologías de restricción de uso genético, coloquialmente conocidas como *genes suicidas*, que hacen infértilas a las semillas que se obtienen, por lo que estos cultivos tienen un único ciclo productivo [30].

Lo anterior se realiza como una medida de bioseguridad; no obstante tiene repercusiones económicas adversas para los productores [101]. De igual forma, al adoptar este tipo de cultivos, las especies nativas y, en especial, aquellas endémicas se ven altamente amenazadas corriendo, incluso, el riesgo de la extinción [56].

En gran medida, la desventaja que presentan los cultivos frente a otras especies vegetales puede atribuirse al refinamiento genético al que han sido sometidos durante el proceso de domesticación [65]. Este proceso busca obtener características productivas deseables, pero ha reducido significativamente la agresividad y capacidad competitiva de los cultivos frente a otras plantas [29, 25].

Factores socioeconómicos

Superficies cultivables

Escasez laboral

Volatilidad productiva

Toxicidad por agroquímicos

Revisión del estado del arte

Actualmente, la predicción climática aún es un reto [62]. No obstante, en trabajos previos como los de Elnesr *et al.* [33, 34] 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 [21].

Similarmente, existen más metodologías que basan su análisis únicamente en datos de temperaturas; por ejemplo, los trabajos de Flores-Gallardo *et al.* (2012) [37], Narayan *et al.* (2014) [68] y Callejas-Rodríguez *et al.* (2023) [15]. 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 [82], 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 [31], 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 [74]. 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 [82] 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 [31], 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 [50], 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 [48]. 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 [28].

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) [84], por ejemplo, emplea el concepto de días de frío acumulado, una herramienta similar a la empleada por Elnesr *et al.* [33, 34], 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) [20] 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) [4] 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 suavizamiento exponencial de Brown como un método confiable para la predicción de la producción de aguacates.

Similarmente, el trabajo de Arizmendi-Peralta (2024) [8] 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) [66] 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) [77] 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.

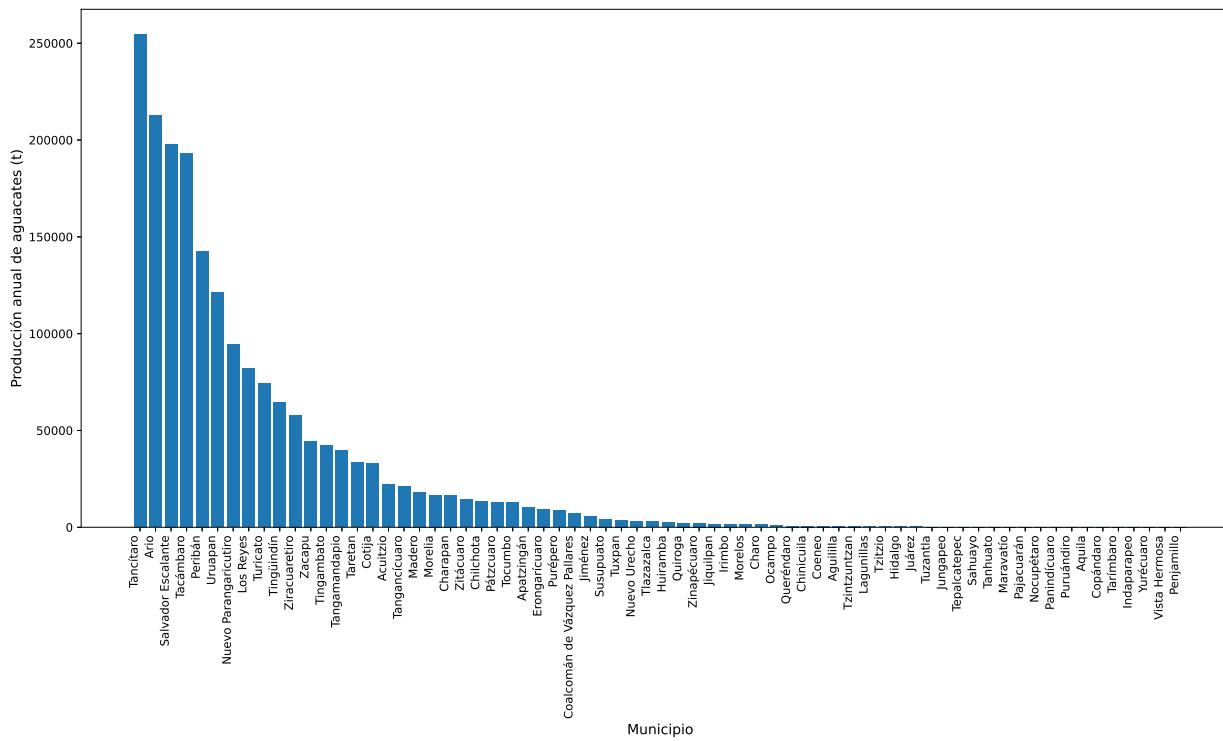
Cronograma de actividades

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.

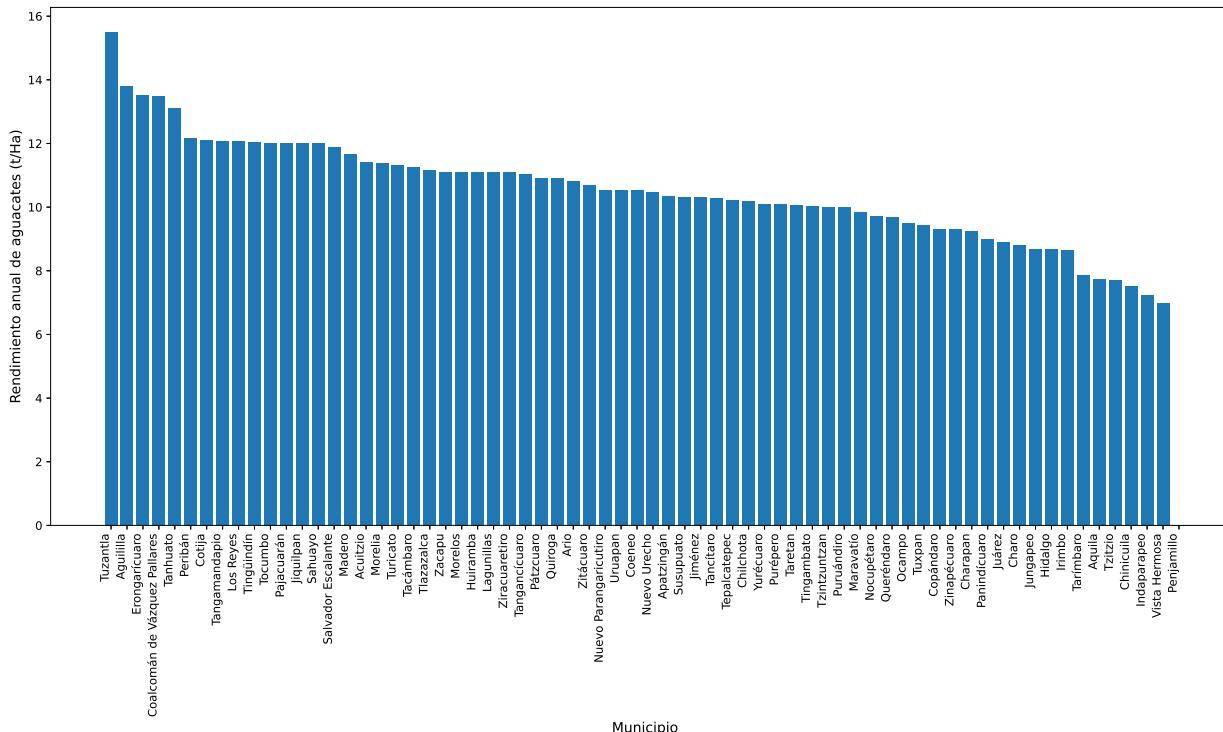
Semestre	Actividades
Agosto – Diciembre 2025	<ul style="list-style-type: none"> • Profundizar la revisión bibliográfica. • Definir y depurar el conjunto de datos con el que se trabajará a lo largo de proyecto. • Explorar técnicas de aprendizaje automático aplicadas a cultivos, tanto para aguacates como 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 [31].

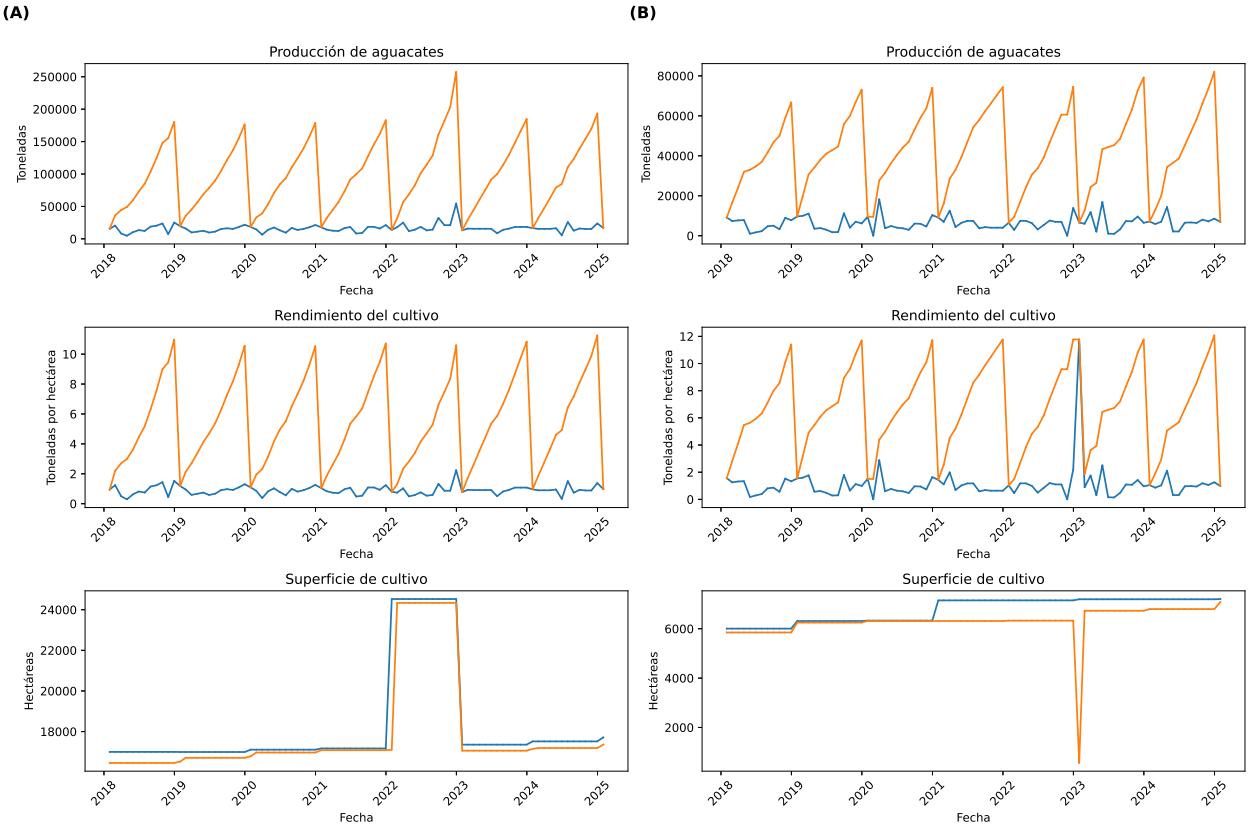


Figura 2: Comparación de producción y rendimiento mensual histórico desde enero de 2018 a enero de 2025 para los municipios de Tacámbaro y Los Reyes. La Figura (A) muestra los datos registrados para Tacámbaro; mientras que, la Figura (B) muestra los datos registrados para Los Reyes. Respecto a la producción 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 [31].

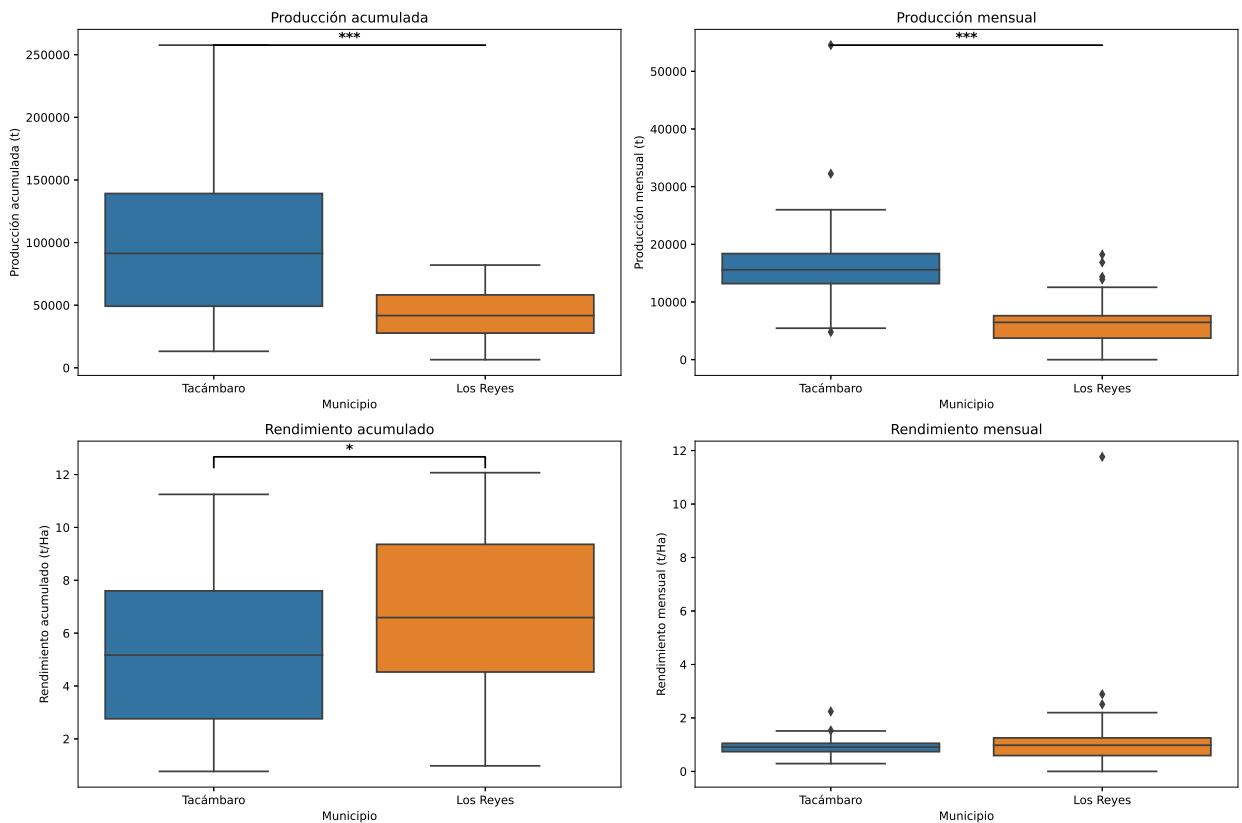


Figura 3: Comparación de producción acumulada, producción mensual, rendimiento acumulado y rendimiento mensual histórico desde enero de 2018 a enero de 2025 para los municipios de Tacámbaro (en azul) y Los Reyes (en naranja). Figura construida a partir de los datos disponibles en [31].

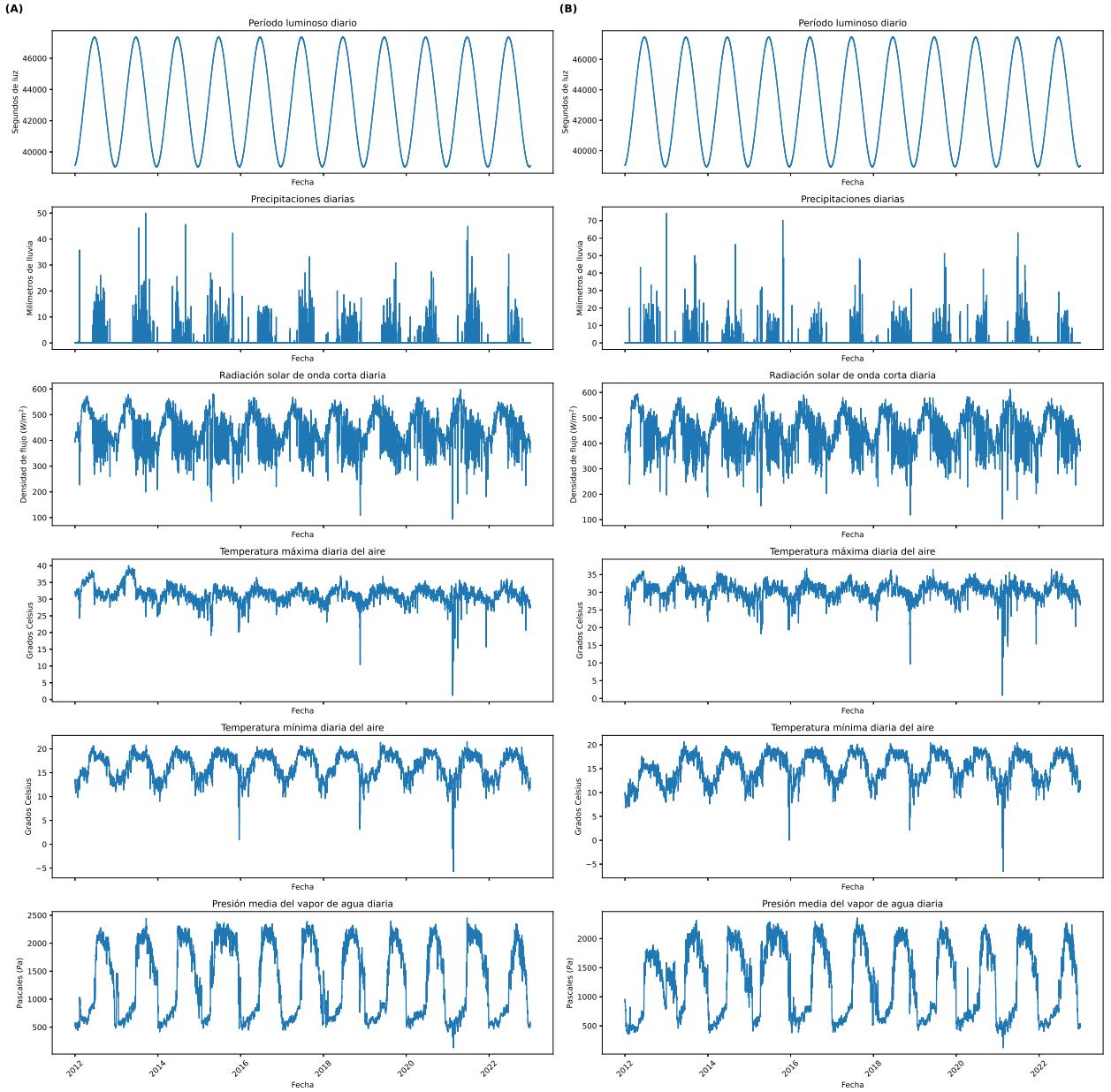


Figura 4: Comparación de características meteorológicas históricas desde 2012 a 2022. La Figura (A) muestra los registros de la estación Pedernales de Tacámbaro, Michoacán; mientras que, la Figura (B) muestra los registros de la estación El Varal de Los Reyes, Michoacán. Figura construida a partir de los datos disponibles en [82].

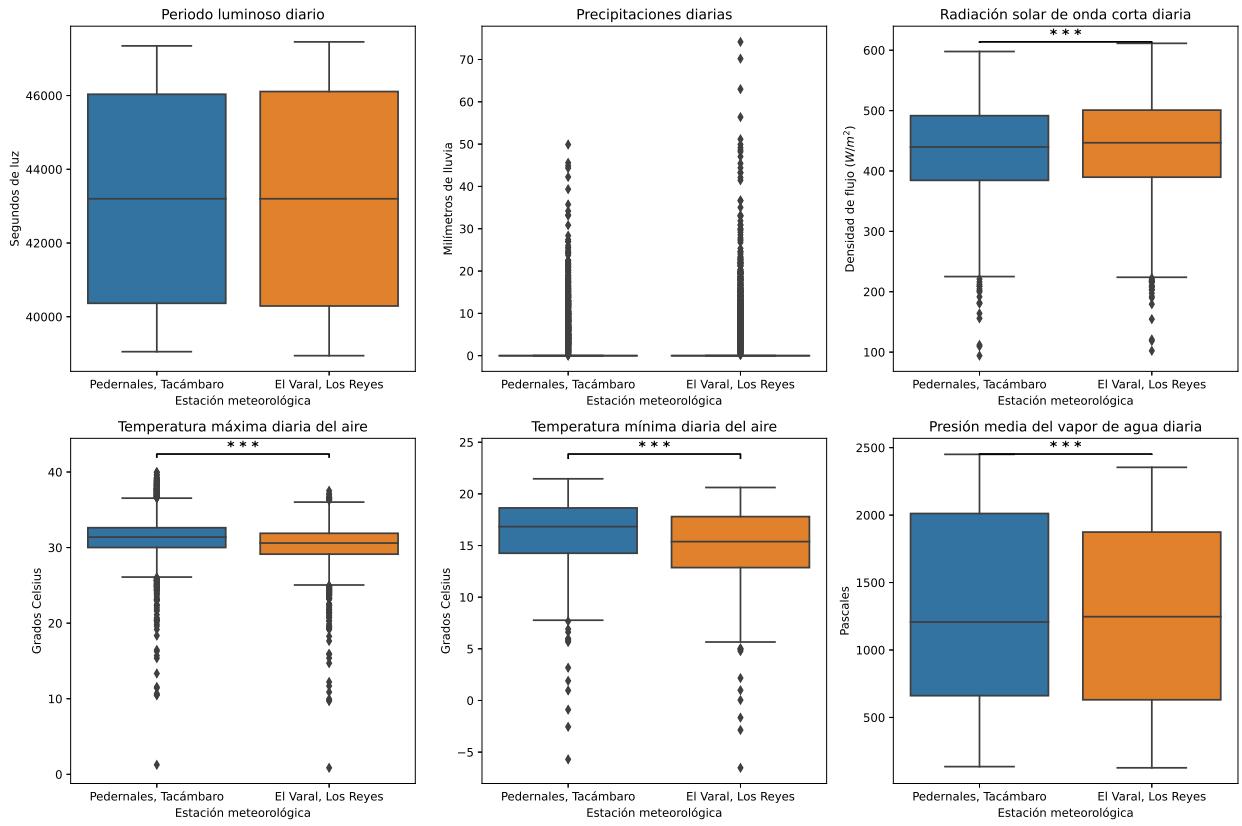
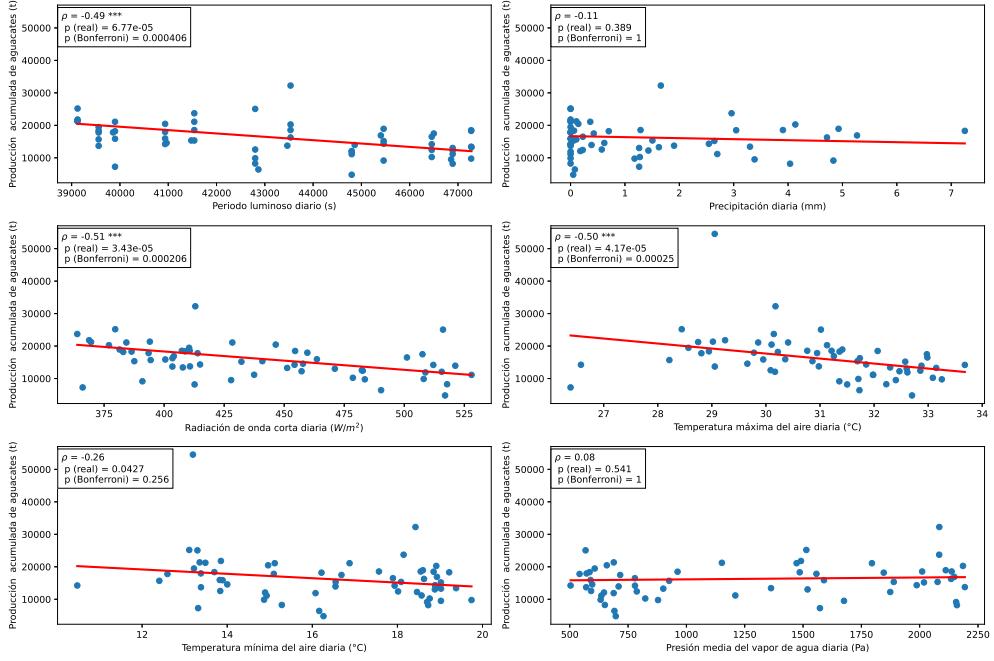
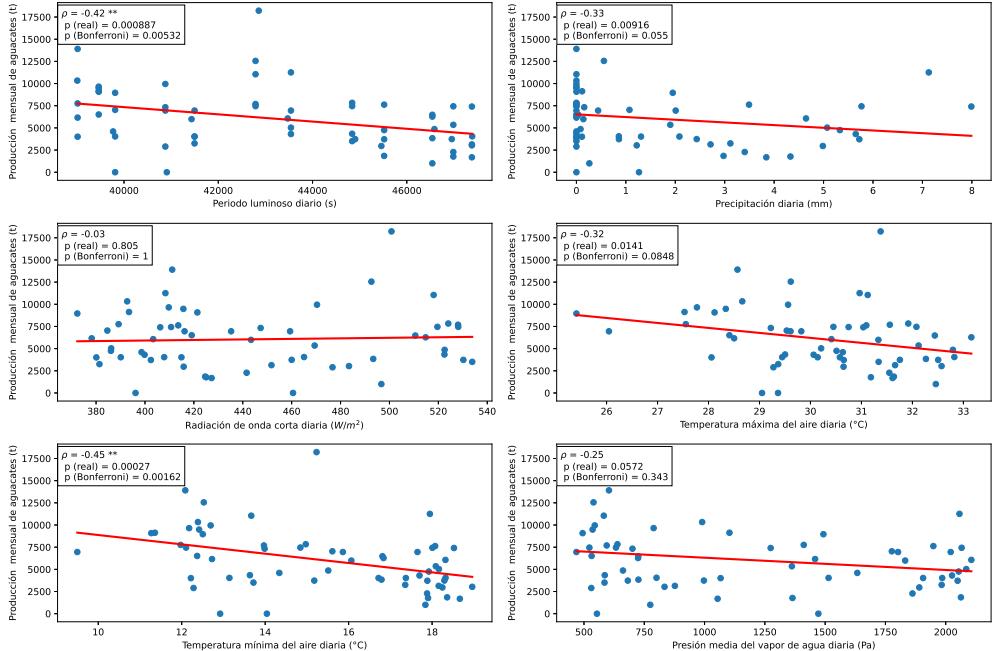


Figura 5: Comparaciones estadísticas entre las características meteorológicas históricas desde 2012 a 2022. En azul se muestran los datos registrados por la estación Pedernales de Tacámbaro, Michoacán; mientras que, en naranja se muestra los registros de la estación El Varal de Los Reyes, Michoacán. 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 [82].

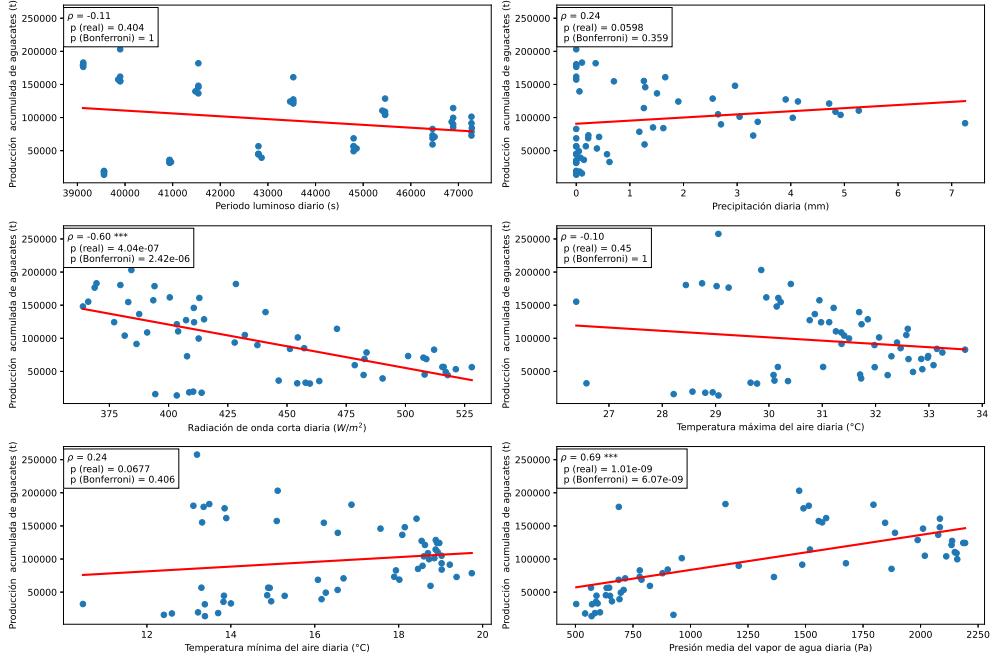


(a) Tacámbaro

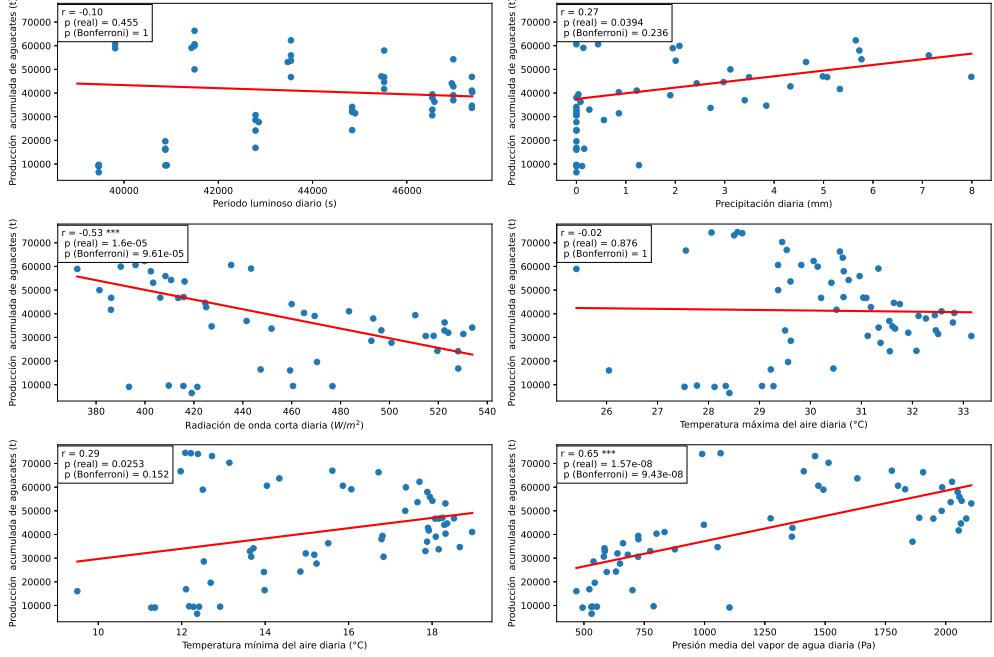


(b) Los Reyes

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 [31] y [82].

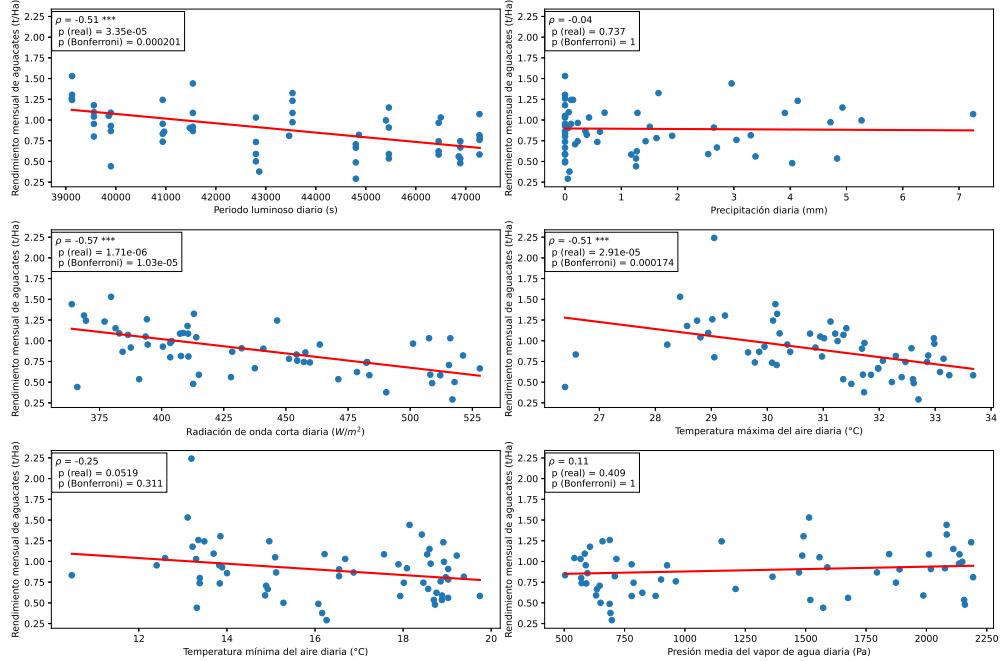


(a) Tacámbaro

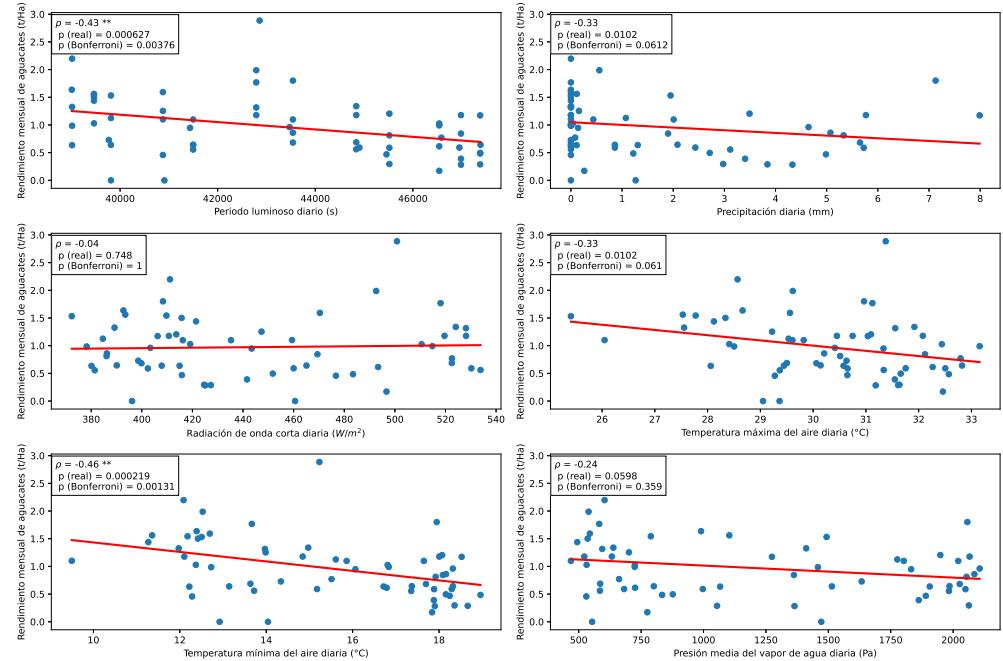


(b) Los Reyes

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 [31] y [82].

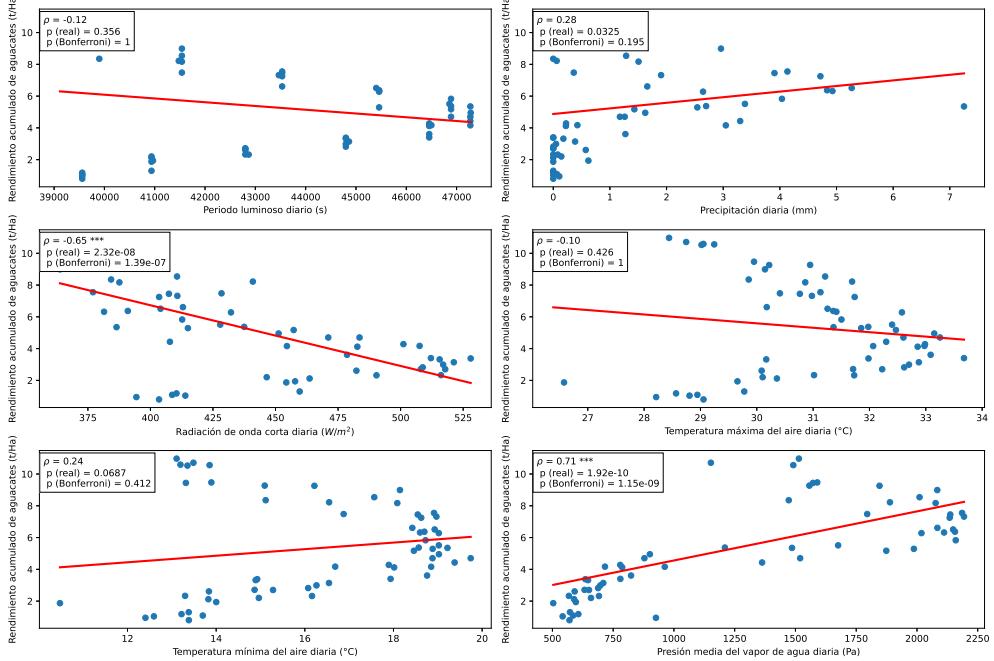


(a) Tacámbaro

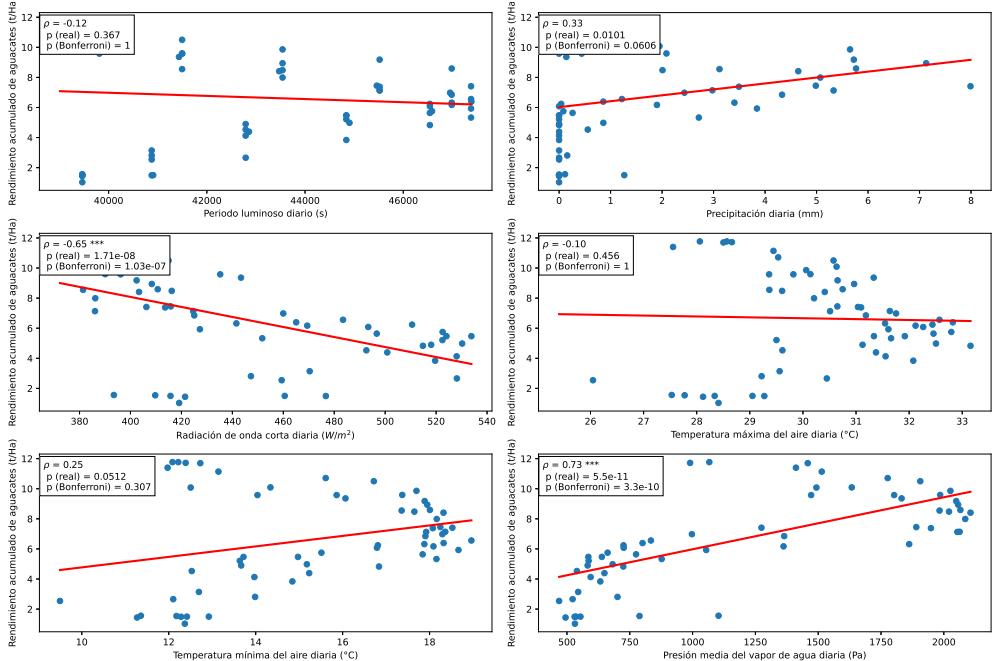


(b) Los Reyes

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 [31] y [82].



(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 [31] y [82].

Referencias

- [1] Velásquez A.C., Castroverde C.D.M., and S.Y. He. Plant-pathogen warfare under changing climate conditions. *Current Biology*, 28(10):R619–R634, 2018.
- [2] J.D. Ackerman. Abiotic pollen and pollination: Ecological, functional, and evolutionary perspectives. *Plant Systematics and Evolution*, 222:167–185, 2000.
- [3] 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.
- [4] M. Akin and S.P. Eyduran. Predicting Avocado Production in Turkey for 2016-2025 Period Using Time Series Analysis. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 27(2):252–258, June 2017.
- [5] B.B. Amrutwad and V.R. Marathe. Plant pollinators: Pillars of ecosystem sustainability. In J.V. Balkhande and J. Vaghmare, editors, *Interdisciplinary Research in Life Sciences: A Path Towards Sustainability*, volume 2, pages 206–219. Advent Publishing, 2024.
- [6] P.K. Anderson, A.A. Cunningham, N.G. Patel, F.J. Morales, P.R. Epstein, and P. Daszak. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in ecology & evolution*, 19(10):535–544, 2004.
- [7] S.H. Anderson, D. Kelly, A.W. Robertson, and J.J. Ladley. 73pollination by birds: A functional evaluation. In *Why Birds Matter: Avian Ecological Function and Ecosystem Services*. University of Chicago Press, 08 2016.
- [8] 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.
- [9] M. Asmamaw, A. Ambellu, and S. Tiku. Resilience of ecosystems to climate change. *American Journal of Environmental Protection*, 4(6):325–333, 2015.
- [10] D.E. Aylor. Spread of plant disease on a continental scale: Role of aerial dispersal of pathogens. *Ecology*, 84(8):1989–1997, 2003.
- [11] 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.
- [12] J.S. Boyer. Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571):443–448, 1982.
- [13] L.A. Burkle and J.B. Runyon. Drought and leaf herbivory influence floral volatiles and pollinator attraction. *Global Change Biology*, 22(4):1644–1654, 2016. Epub 2016 Feb 9.

- [14] J.E. Byers. Impact of non-indigenous species on natives enhanced by anthropogenic alteration of selection regimes. *Oikos*, 97(3):449–458, 2002.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] S.M. Carthew and R.L. Goldingay. Non-flying mammals as pollinators. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(3):104–108, 1997.
- [18] L.G. Carvalheiro, C.L. Seymour, R. Veldtman, and S.W. Nicolson. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity-rich areas. *Journal of Applied Ecology*, 47(4):810–820, 2010.
- [19] L. Cassani and A. Gomez-Zavaglia. Sustainable food systems in fruits and vegetables food supply chains. *Frontiers in Nutrition*, 9, February 2022.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] X. Cheng, H. Li, Q. Tang, H. Zhang, T. Liu, and Y. Wang. Trends in the global commercialization of genetically modified crops in 2023. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(12):3943–3952, 2024.
- [23] S. Clemente and L. Adler. What is pollination and what are pollinators in agriculture? In P. Kevan and S. Willis Chan, editors, *Promoting pollination and pollinators in farming*. Burleigh Dodds Science Publishing, 1st edition, 2023.
- [24] 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.
- [25] G. Concenço, I. Aspiazú, E.A. Ferreira, L. Galon, and A.F. da Silva. Physiology of crops and weeds under biotic and abiotic stresses. In Mohammad Mahdi Najafpour, editor, *Applied Photosynthesis*, chapter 12. IntechOpen, Rijeka, 2012.
- [26] J.E. Cresswell, J. Krick, M.A. Patrick, and M. Lahoubi. The aerodynamics and efficiency of wind pollination in grasses. *Functional Ecology*, 24(4):706–713, 2010.

- [27] 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.
- [28] F. Curtin and P. Schulz. Multiple correlations and Bonferroni’s correction. *Biological Psychiatry*, 44(8):775–777, October 1998.
- [29] Antonio Alberto Da Silva, Francisco Affonso Ferreira, Lino Roberto Ferreira, and José Barbosa dos Santos. Biología de plantas daninhas. *Tópicos em manejo de plantas daninhas*. Editora UFV. Universidad Federal de Viçosa, Viçosa-MG (Brasil), pages 48–55, 2007.
- [30] H. Daniell. Molecular strategies for gene containment in transgenic crops. *Nature Biotechnology*, 20(6):581–586, 2002.
- [31] 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/.
- [32] C.A. Deutsch, J.J. Tewksbury, M. Tigchelaar, D.S. Battisti, Merrill S.C., R.B. Huey, and R.L. Naylor. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405):916–919, 2018.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] C. Folke, S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist, L. Gunderson, and C.S. Holling. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(Volume 35, 2004):557–581, 2004.

- [39] A.E. Fonseca and M.E. Westgate. Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research*, 94(2):114–125, 2005.
- [40] J. Friedman and S.C.H. Barrett. Wind of change: new insights on the ecology and evolution of pollination and mating in wind-pollinated plants. *Annals of botany*, 103(9):1515–1527, 2009.
- [41] S. García-Lara and S.O. Serna-Saldivar. Insect pests. In B. Caballero, Finglas P.M., and F. Toldrá, editors, *Encyclopedia of Food and Health*, pages 432–436. Academic Press, Oxford, 2016.
- [42] K.A. Grogan. When ignorance is not bliss: Pest control decisions involving beneficial insects. *Ecological Economics*, 107:104–113, 2014.
- [43] S. Guo, L. Cui, J. Xu, M. Liu, W. Wang, A. Xia, Z. Zhang, Y. Yang, X. Xu, and X. Cui. A global synthesis of plant-plant interaction investigations: current knowledge and future directions. *Plant and Soil*, February 2025.
- [44] J.A. Harvey, K. Tougeron, R. Gols, R. Heinen, M. Abarca, P.K. Abram, Y. Basset, M. Berg, C. Boggs, J. Brodeur, P. Cardoso, J.G. de Boer, G.R. De Snoo, C. Deacon, J.E. Dell, N. Desneux, M.E. Dillon, G.A. Duffy, L.A. Dyer, J. Ellers, A. Espíndola, J. Fordyce, M.L. Forister, C. Fukushima, M.J.G. Gage, C. García-Robledo, C. Gely, M. Gobbi, C. Hallmann, T. Hance, J. Harte, A. Hochkirch, C. Hof, A.A. Hoffmann, J.G. Kingsolver, G.P.A. Lamarre, W.F. Laurance, B. Lavandero, S.R. Leather, P. Lehmann, C. Le Lann, M.M. López-Uribe, C.S. Ma, G. Ma, J. Moiroux, L. Monticelli, C. Nice, P.J. Ode, S. Pincebourde, W.J. Ripple, M. Rowe, M.J. Samways, A. Sentis, A.A. Shah, N. Stork, J.S. Terblanche, M.P. Thakur, M.B. Thomas, J.M. Tylianakis, J. Van Baaren, M. Van de Pol, W.H. Van der Putten, H. Van Dyck, W.C.E.P. Verberk, D.L. Wagner, W.W. Weisser, W.C. Wetzel, H.A. Woods, K.A.G. Wyckhuys, and S.L. Chown. Scientists' warning on climate change and insects. *Ecological Monographs*, 93(1), November 2022.
- [45] 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.
- [46] W.H. Hodge and C.O. Erlanson. Federal plant introduction — a review. *Economic Botany*, 10:299–334, 1956.
- [47] S.E. Hoover, J.J. Ladley, A.A. Shchepetkina, M. Tisch, S.P. Gieseg, and J.M. Tylianakis. Warming, co₂, and nitrogen deposition interactively affect a plant-pollinator mutualism. *Ecology Letters*, 15(3):227–234, 2012.
- [48] 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.

- [49] S. Iqbal, F. Begum, B.A. Nguchu, et al. The invisible architects: microbial communities and their transformative role in soil health and global climate changes. *Environmental Microbiome*, 20, 2025.
- [50] 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.
- [51] J.K. Jansson and K.S. Hofmockel. Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18:35–46, 2020.
- [52] M.S. Jones and W.E. Snyder. Beneficial insects in agriculture: Enhancement of biodiversity and ecosystem services. *Insect biodiversity: Science and society*, 2:105–122, 2018.
- [53] J. Katan. Diseases caused by soilborne pathogens: Biology, management and challenges. *Journal of Plant Pathology*, 99(2):305–315, 2017.
- [54] C.A. Kearns, D.W. Inouye, and N.M. Waser. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, pages 83–112, 1998.
- [55] K. Kiritani. Different effects of climate change on the population dynamics of insects. *Applied Entomology and Zoology*, 48(2):97–104, January 2013.
- [56] K. Kumar, G. Gambhir, A. Dass, A.K. Tripathi, A. Singh, A.K. Jha, P. Yadava, M. Choudhary, and S. Rakshit. Genetically modified crops: current status and future prospects. *Planta*, 251, 2020.
- [57] S. Kumar, T.K. Kler, G.S. Sekhon, et al. Impacts on avian migratory patterns due to climate change and hormonal disruption: a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29, 2024.
- [58] R. Lahlali, M. Taoussi, L. Salah-Eddine, G. Gachara, R. Ezzougari, Z. Belabess, K. Aberkani, A. Assouguem, A. Meddich, M. El Jarroudi, and E. Ait Barka. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*, 3(3):159–170, 2024.
- [59] K.N. Liss, M.G.E. Mitchell, G.K. MacDonald, S.L. Mahajan, J. Méhot, A.L. Jacob, D.Y. Maguire, G.S. Metson, C. Ziter, K. Dancose, K. Martins, M. Terrado, and E.M. Bennett. Variability in ecosystem service measurement: a pollination service case study. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(8):414–422, 2013.
- [60] S. Luna V., J. Figueroa M., B. Baltazar M., R. Gomez L., R. Townsend, and J. B. Schoper. Maize pollen longevity and distance isolation requirements for effective pollen control. *Crop Science*, 41(5):1551–1557, 2001.
- [61] 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.

- [62] 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.
- [63] J. Memmott, P.G. Craze, N.M. Waser, and M.V. Price. Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology letters*, 10(8):710–717, 2007.
- [64] A.F Moraes García, L. Micheletti Broglia, 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.
- [65] X. Moreira, L. Abdala-Roberts, R. Gols, and M. Francisco. Plant domestication decreases both constitutive and induced chemical defences by direct selection against defensive traits. *Scientific Reports*, 8, 2018.
- [66] 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.
- [67] U.G. Mueller, N.M. Gerardo, D.K. Aanen, D.L. Six, and T.R. Schultz. The evolution of agriculture in insects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36(Volume 36, 2005):563–595, 2005.
- [68] 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.
- [69] P. Niemelä and W.J. Mattson. Invasion of north american forests by european phytophagous insects: Legacy of the european crucible? *BioScience*, 46(10):741–753, 11 1996.
- [70] J. Ollerton, R. Winfree, and S. Tarrant. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3):321–326, 2011.
- [71] 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.
- [72] 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.

- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] S. Pincebourde and J. Casas. Narrow safety margin in the phyllosphere during thermal extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(12):5588–5596, 2019.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] N.E. Rafferty. Effects of global change on insect pollinators: multiple drivers lead to novel communities. *Current Opinion in Insect Science*, 23:22–27, 2017. Global change biology * Molecular physiology.
- [79] Surinder Singh Rana and MC Rana. Principles and practices of weed management. *Department of Agronomy, College of Agriculture, CSK Himachal Pradesh Krishi Vishvavidyalaya, Palampur*, 138, 2016.
- [80] A. Raza, A. Razzaq, S.S. Mahmood, 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.
- [81] 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.
- [82] 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. RPDA INIFAP-03-2021-120109052200-01. Disponible en: <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/DatosIndirectos/NEssenger>.
- [83] 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.

- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] D. Salinas Vargas, A. Cruz Mendívil, 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.
- [87] N. Savary, S. and Mcroberts, P.D. Esker, L. Willocquet, and P.S. Teng. Production situations as drivers of crop health: evidence and implications. *Plant Pathology*, 66(6):867–876, 2017.
- [88] S. Savary, S. Bregaglio, L. Willocquet, et al. Crop health and its global impacts on the components of food security. *Food Security*, 9:311–327, 2017.
- [89] Serge Savary, Neil Mcroberts, Paul D. Esker, Laetitia Willocquet, and Paul S. Teng. Production situations as drivers of crop health: evidence and implications. *Plant Pathology*, 66(6):867–876, 2017.
- [90] 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>.
- [91] H.A. Sherwin, W.I. Montgomery, and M.G. Lundy. The impact and implications of climate change for bats. *Mammal Review*, 43(3):171–182, 2012.
- [92] C.J.B. Sorte, I. Ibáñez, D.M. Blumenthal, N.A. Molinari, L.P. Miller, E.D. Grosholz, J.M. Diez, C.M. D’Antonio, J.D. Olden, S.J. Jones, and J.S. Dukes. Poised to prosper? a cross-system comparison of climate change effects on native and non-native species performance. *Ecology Letters*, 16(2):261–270, 2013.
- [93] E.E. Stange and M.P. Ayres. Climate change impacts: Insects. *Encyclopedia of life sciences*, 1:1–7, 2010.
- [94] B. Steen, A. Adde, M.A. Schlaepfer, A. Guisan, and L. Maiorano. Distributions of non-native and native plants are not determined by the same environmental factors. *Ecological Solutions and Evidence*, 5(4):e12374, 2024. e12374 ESO-24-01-001.R2.

- [95] 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.
- [96] L.J. Thomson, S. Macfadyen, and A.A. Hoffmann. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological control*, 52(3):296–306, 2010.
- [97] W. Thuiller, S. Lavorel, M.B. Araújo, M.T. Sykes, and I.C. Prentice. Climate change threats to plant diversity in europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(23):8245–8250, 2005.
- [98] R.E. Trejo-Salazar, L.E. Eguiarte, D. Suro-Piñera, and R.A. Medellin. Save Our Bats, Save Our Tequila: Industry and Science Join Forces to Help Bats and Agaves. *Natural Areas Journal*, 36(4):523 – 530, 2016.
- [99] K.E. Trenberth. What are the seasons? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64(11):1276 – 1282, 1983.
- [100] R.R. Upasani and S. Barla. Weed dynamics in changing climate. *Journal of Experimental Botany*, 66(12):3435–3450, 2018.
- [101] R.C. Van Acker, A.R. Szumgalski, and L.F. Friesen. The potential benefits, risks and costs of genetic use restriction technologies. *Canadian Journal of Plant Science*, 87(4):753–762, 2007.
- [102] C. Verma, S. Nanda, R.K. Singh, R.B. Singh, and S. Mishra. A review on impacts of genetically modified food on human health. *Open Nutraceuticals J*, 4(1):3–11, 2011.
- [103] 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.
- [104] N. Ward and G.J. Masters. Linking climate change and species invasion: an illustration using insect herbivores. *Global Change Biology*, 13(8):1605–1615, 2007.
- [105] D.M. Watson, R.C. McLellan, and F.E. Fontúbel. Functional roles of parasitic plants in a warming world. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 53(Volume 53, 2022):25–45, 2022.
- [106] B.L. Webber and J.K. Scott. Rapid global change: implications for defining natives and aliens. *Global Ecology and Biogeography*, 21(3):305–311, 2012.
- [107] C. Westerkamp and G. Gottsberger. Diversity pays in crop pollination. *Crop science*, 40(5):1209–1222, 2000.
- [108] J.C. Zadoks and R.D. Schein. *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press, United Kingdom, 1979.

- [109] R. Zamora and A. Mellado. Identifying the abiotic and biotic drivers behind the elevational distribution shift of a parasitic plant. *Plant Biology*, 21(2):307–317, 2019.
- [110] S. Zhang, Y. Zhang, F. Yang, C. Zhou, H. Shen, B. Wang, J. Zeng, D.R. Reynolds, J.W. Chapman, and G. Hu. Climate change is leading to an ecological trap in a migratory insect. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(9):e2422595122, 2025.
- [111] L.H. Ziska, J.S. Pettis, J. Edwards, J.E. Hancock, M.B. Tomecek, A. Clark, J.S. Dukes, I. Loladze, and H.W. Polley. Rising atmospheric co₂ is reducing the protein concentration of a floral pollen source essential for north american bees. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1828):20160414, 2016.