

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
El cambio climático y su relación con la fitopatología: Revisión de
literatura

Estudiante

Karen Rocío Morales Pivaral

Asesores

Carolina Avellaneda, Ph.D.

Lenin Henríquez, Ph.D.

Honduras, junio 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ROGEL CASTILLO

Director nombre Departamento Académico

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	6
Índice de figuras.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Metodología.....	13
Estrategia de búsqueda	13
Criterios de inclusión y exclusión.....	13
Resultados y Discusión.....	14
Cambio Climático	14
¿Por qué el cambio climático afecta la presencia de plagas y enfermedades en los cultivos?	15
La energía solar	15
Calentamiento Global	16
Efecto invernadero.....	17
Las circulaciones atmosféricas-oceánicas.....	19
Circulación atmosférica.....	19
Impactos del cambio climático en 1998 a 2021.....	19
El Huracán Mitch.....	20
Etapas de evolución de perturbación tropical a Huracán.....	21
Efecto de las altas precipitaciones y vientos sobre la población de insectos.....	22
Sequía.....	23
El corredor seco Centroamericano	23
Efectos de la sequía sobre la población de insectos.....	24
Fenómeno del Niño.....	25

Fenómeno de la Niña	25
Casos del efecto del cambio climático sobre plagas y enfermedades agrícolas	27
Dispersión aérea de patógenos a nivel mundial y escalas continentales y su impacto en las enfermedades de las plantas	28
Invasión de nuevo territorio	29
Dinámica poblacional de eventos raros.....	29
Extinción local y Recolonización	30
Adaptación al hospedero resistente	31
¿Qué tan inusuales son los patógenos de los cultivos?	31
Predecir los efectos del cambio climático sobre los enemigos naturales de las plagas agrícolas.....	31
Cambios de distribución en plantas, huéspedes y enemigos naturales	33
Respuestas térmicas y de desecación.....	33
Cambios mediados por la administración.....	34
Potencial evolutivo	34
Observaciones finales	35
Epidemiología	36
La Pirámide de las Enfermedades	36
Factores que influyen en la emergencia de hongos patógenos	37
Importancia de la epidemiología en agricultura	38
Mycosphaerella fijiensis Sigatoka	39
Hemileia vastatrix Roya del café	40
Guerra de las plantas y patógenos en un clima cambiante	41
Efectos del cambio climático sobre los cultivos.....	43
Temperatura	46
Disponibilidad de Agua	47

Efecto combinado de múltiples factores ambientales	47
Mecanismos moleculares subyacentes ambientales.....	48
Mecanismos de modulación ambiental de la virulencia de patógenos.....	49
Enfoques experimentales	50
Conclusión.....	53
Recomendaciones	54
Referencias.....	55

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Principales gases de efecto invernadero conocidos por el protocolo de Kioto	18
Cuadro 2 Histórico de eventos ciclónicos que han afectado a Honduras, periodo 1998 - 2020.....	21
Cuadro 3 Irregularidades en el periodo de lluvias que han desencadenado en sequías, periodo 1991-2018	23
Cuadro 4 Fenómeno de la niña y el niño en el periodo de 1998 a 2021	27

Índice de figuras

Figura 1 Mapa de área incluidas que recorre el corredor seco en Centroamérica.	24
Figura 2 Corriente cálida de El Niño y corriente fría de La Niña.	26
Figura 3 Triángulo de la enfermedad: la enfermedad depende de las interacciones entre la planta hospedera, el patógeno y el ambiente	37

Resumen

A nivel mundial la fitopatología ha jugado un factor importante en el desarrollo de muchos cultivos. Se ha comprobado que los factores climáticos pueden afectar directamente en la propagación de los patógenos que afectan a la agricultura. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión fue relacionar los cambios climáticos con la aparición de epidemias en cultivos de importancia económica. Para esto se recopiló información de los fenómenos climáticos que se presentaron los últimos 23 años en la región centroamericana. Dichos fenómenos generaron impactos en los sistemas agrícolas y afectaron diversidad de cultivos. Dentro de esta recopilación de información se tuvieron en cuenta dos patógenos para demostrar como los fenómenos climáticos ayudan a la dispersión de estos en un menor tiempo. Con relación al cambio climático, científicos han estudiado distintos cultivos tomando en cuenta todos los factores que podrían indicar, de los cuales podemos mencionar el aumento de temperatura, escases de agua, aumento de CO₂, y otros. En algunas regiones se han implementado estaciones experimentales sometiendo cultivos a distintas situaciones y fitopatógenos que nos permiten conocer su comportamiento dependiendo la situación del clima y ambiente. Se determinó que las condiciones climáticas están relacionadas con la presencia de nuevos patógenos en distintas regiones y aparición de epidemias en los cultivos.

Palabras clave: Cambio climático, epidemiología, fitopatología.

Abstract

Worldwide, plant pathology has played an important factor in the development of many crops. It has been shown that climatic factors can directly affect the spread of pathogens that affect agriculture. Therefore, the objective of this review was to relate climatic changes to the occurrence of epidemics in economically important crops. For this purpose, information was compiled on the climatic phenomena that occurred over the last 23 years in the Central American region. These phenomena had an impact on agricultural systems and affected crop diversity. Within this compilation of information, two pathogens were taken into account to demonstrate how climatic phenomena help the dispersion of these pathogens in a shorter time. In relation to climate change, scientists have studied different crops taking into account all the factors that could indicate, of which we can mention the increase in temperature, water scarcity, increase in CO₂, and others. In some regions, experimental stations have been implemented subjecting crops to different situations and phytopathogens that allow us to know their behavior depending on the climate and environmental situation. It was determined that climatic conditions are related to the presence of new pathogens in different regions and the appearance of epidemics in crops.

Keywords: Climate change, epidemiology, plant pathology.

Introducción

Los cambios en las condiciones climáticas han provocado un desbalance en la biodiversidad en distintas regiones, lo que también ha causado cambios drásticos en el medio ambiente, un ejemplo de estos cambios son las sequías, precipitación, entre otros. Estos han dado lugar a diferentes sucesos que han alterado los ciclos normales de ciertos patógenos causantes de diversas enfermedades en cultivos (Jiménez Díaz 2008). El cambio climático juega un papel fundamental en la aparición de nuevos brotes de enfermedades. Este se define como la modificación significativa del clima en comparación a la historia climática del planeta (Uribe Botero 2015). El clima está determinado por un conjunto de factores que lo modifican, entre ellos están la temperatura promedio anual, temperatura media y promedio de precipitación anual, promedio de variabilidad típica, tales como temperatura máxima/mínima de temporada.

Usualmente, los fenómenos de variabilidad climática son cíclicos y no ocasionan cambios de largo plazo; es decir después de que ocurren, las condiciones climáticas regresan al rango normal. Esta es la diferencia entre variabilidad y cambio climático. Por lo tanto, este último provoca cambios en largo plazo y dificulta en el regreso a las condiciones iniciales o normales. En un futuro los investigadores aseguran que “aumentarán las temperaturas medias, se afectará el régimen de lluvias, y los eventos climáticos extremos como tormentas, inundaciones, sequías y olas de calor se incrementarán en frecuencia e intensidad” (Alexander et al. 2013).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señala claramente que las actividades humanas contribuyen en gran medida al calentamiento global y al cambio climático, y esto se debe principalmente a las diversas actividades industriales, que han incrementado los gases de efecto invernadero, y la expansión de la frontera agrícola. En los últimos años estas actividades han provocado algunos desastres naturales, que, según el análisis de expertos, las consecuencias y el impacto que tendrían en el medio ambiente serían poco alentadoras. El retardo de las temporadas de lluvias, las sequías prolongadas, la mala calidad de los suelos, la reducción del

número de especies y variedades, el aumento de la temperatura, la mayor incidencia de plagas y enfermedades, y la reducción de los rendimientos, son algunas de las evidencias de que el cambio climático afecta la agricultura (Nelson et al. 2009). La epidemiología señaló que huéspedes más sensibles, patógenos más agresivos y un ambiente más favorable ayudan a incrementar la enfermedad de un cultivo dado. Por lo tanto, en un enfoque sistémico, en su conjunto, una epidemia se compone de una serie de ciclos de infección que ocurren ampliamente debido a la interacción entre las unidades infecciosas del patógeno en la población de la planta huésped entorno o estado climático favorable (van der Plank 2014).

La agricultura es responsable de alrededor de la mitad de las emisiones antropogénicas de metano el cual tiene un potencial de calentamiento global 28 veces mayor al del CO₂. Las emisiones de metano agrícola provienen de los fenómenos entéricos, la quema de biomasa para preparar los campos de cultivo, la aplicación de esta tierra con fertilizante en pasturas, la gestión de estiércol y el cultivo de arroz por inundación. Según la FAO (2020) el cambio climático posee un efecto cascada sobre la agricultura, los medios de vida y la seguridad. Una serie de impactos físicos biológicos y biofísicos afectan los ecosistemas y agroecosistemas, lo cual se traduce en impacto para la producción agrícola. Las epidemias en los cultivos son el resultado de procesos biológicos (llamados procesos epidemiológicos). Estos procesos son el ciclo de infección o el ciclo de patogénesis, y los denominan "procesos de ciclo único". Una serie de procesos de ciclo único constituyen un proceso de ciclo múltiple. Si la epidemia se considera como una cadena del ciclo de infección, se puede inferir que la epidemia es un proceso de ciclos múltiples que involucra una serie de procesos de ciclo único que ocurren en el tiempo y el espacio. Esto se puede trazar en la curva de progresión de la epidemia.

Las variables climáticas más importantes para la agricultura son la temperatura, las precipitaciones, los niveles de humedad en el medio ambiente y el suelo, la radiación solar y la concentración de CO₂ en la atmósfera. Se prevé que, a finales del siglo XXI, la temperatura media aumentará en unos 2°C y la concentración de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero

aumentará rápidamente. El aumento de las sequías y los fenómenos meteorológicos extremos tienen consecuencias impredecibles para el cambio climático causando grandes impactos. Se ha comentado ampliamente (Mora Aguilera et al. 2014) sobre el impacto del cambio climático en la incidencia y epidemiología de las enfermedades fúngicas de las plantas y las plagas causadas por insectos. Por el contrario, el número de comentarios (Mora Aguilera et al. 2014) sobre el mismo tema solo sobre enfermedades causadas por virus es muy pequeño.

Se ha diseñado estaciones experimentales patológicas, estudiando los efectos del cambio climático que tienen parámetros importantes (básicamente temperatura y eCO_2) investigado en detalle, para distintas condiciones ambientales, los efectos de sus cambios, es un campo poco estudiado, que han evaluado distintos factores climáticos, incluidos los gases de efecto invernadero. Además del dióxido de carbono, las lluvias, la humedad relativa y el aumento o disminución de eventos anormales como tornados e inundaciones.

En la actualidad es necesario fortalecer la investigación sobre el cambio climático y sus consecuencias en los sistemas agrícolas. Por lo tanto, el objetivo fue relacionar los cambios climáticos con la aparición de epidemias en cultivos de importancia económica y demás.

Metodología

Estrategia de búsqueda

Este estudio que se considera descriptivo el cual se llevó a cabo entre los meses enero a junio de 2021, donde se realizó una búsqueda de literatura en las bases de datos Science Direct, APS press, Springer Link, Scopus, Science, AgriPerfiles, Scielo, Phytomas, así como las páginas oficiales de la FAO, la FDA, CEPAL, SENASA e IPCC. Se realizó una búsqueda con la ayuda de la plataforma de Google Scholar y la Biblioteca Wilson Popenoe, mediante palabras clave como: Cambio climático, epidemiología, patógenos en la agricultura, patógenos, fitopatología, agricultural epidemiology.

Criterios de inclusión y exclusión

Solo se incluyeron artículos originales reportados en literatura científica escritos en inglés y español en los últimos 23 años (1998 a 2021), y se realizó una selección de 66 artículos (incluyendo artículos, libros y páginas oficiales). Se excluyeron los artículos relacionados con la epidemiología en humanos y epidemiología en los animales.

Resultados y Discusión

Cambio Climático

A las variaciones observadas en el clima durante periodos consecutivos a lo largo de las décadas, es decir, durante periodos relativamente largos, se le denomina cambio climático, por lo que cualquier cambio significativo puede dar lugar a un fenómeno o un nuevo clima. Los fenómenos atmosféricos ocurren en distintas escalas que van desde tiempo atmosférico hasta clima (Torres Puente 2019). Durante muchos años el estado climático, había permanecido constante, sin embargo, con el paso del tiempo ha presentado variaciones e irregularidades. El medio ambiente es lo que ha experimentado el día a día según el estado atmosférico momentáneo y se caracteriza por la temperatura, velocidad y la dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, húmeda y nubosidad (Rodríguez y Suazo 2017). Para algunos países latinoamericanos ya se han estudiado ciertos efectos del cambio climático en la agricultura. En general se ha encontrado que la magnitud de los impactos es diferente entre los países, e incluso entre regiones de un mismo país (Niggol Seo y Mendelsohn 2008). Los países de Centroamérica se encuentran entre los principales con alto riesgo climático a nivel mundial. Son países sobre los que los fenómenos climáticos han mostrado mayores efectos negativos (Ordaz et al. 2010).

Las variaciones de la radiación solar, los parámetros orbitales de la Tierra, los movimientos de la corteza terrestre y las actividades industriales, agrícolas y humanas, son factores que son de gran importancia en el cambio climático. Algunos aspectos del sistema climático también pueden producir fluctuaciones de alta magnitud y variabilidad a través de los procesos de retroalimentación de los componentes del sistema climático (Leyva 1998).

Las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero están aumentando notablemente como consecuencia de las actividades de la humanidad, alterando la composición de la atmósfera e induciendo cambios climáticos que directamente afectan a fitopatología (Blunden y Arndt 2015). Hay evidencias que indican que los fenómenos que observamos día a día están influenciados

por factores de mayor escala tanto temporal como espacial; Ejemplo de ello son la intensidad y frecuencia de las lluvias, así como el número de huracanes y tormentas tropicales (Torres Puente 2019).

¿Por qué el cambio climático afecta la presencia de plagas y enfermedades en los cultivos?

El cambio climático es una de las causas de la modificación de las temperaturas, la humedad y los gases de la atmósfera, en especial acumulación de GEI, lo que puede favorecer el crecimiento de hongos e insectos, alterando la interacción del triángulo de la enfermedad y por tanto reducciones en la producción de los cultivos de interés (Quiroga 2015).

Diversas investigaciones han demostrado la fluctuación en la incidencia de plagas tanto en zonas templadas como en tropicales, asociadas a eventos de periodo de sequía y combinación de sequía y humedad relativa alta. Bajo condiciones de clima extremo el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) de Cuba, identificaron los siguientes problemas fitosanitarios. Aparición de nuevas plagas a nivel regional, cambios en los ciclos de la vida de las plagas, reducción de organismos benéficos y reducción en la efectividad de los métodos de control (Quiroga 2015).

La energía solar

La mayor cantidad de energía que entra en la tierra, es en forma de radiación solar entre los trópicos de cáncer y capricornio. Dado que la tierra no es esférica, la región tropical y ecuatorial experimenta una constante excedente de energía o altas temperaturas mientras que en el polo norte y en el polo sur un constante déficit o temperaturas muy bajas (Rodríguez y Suazo 2017). La distribución de la energía solar depende de la geografía y estacionalmente de la geodesia de la tierra, y cómo influye la inclinación de su eje y su posición en las órbitas alrededor del sol normalmente el sol emite una regresión compuesta por rayos ultravioleta, luz visible e infrarrojo corto (Tejada Martínez y Gómez Azpeitia 2015). La tercera parte de esta radiación está reflejada al espacio por nubes, la atmósfera y la superficie terrestre el resto de energía es absorbida por los océanos, el suelo,

las plantas, los objetos y los gases de efecto invernadero que componen la atmósfera las redes. La radiación solar absorbida calienta la atmósfera y principalmente la superficie terrestre y oceánica; no obstante, la energía no es almacenada sino emitida de regreso al espacio en forma de radiación de infrarrojo lejano. Además, en algunas ocasiones estudios se ha llegado a tomar un 10% de las relaciones terrestres se escapa directamente al espacio mientras que el resto es captado por los Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Tejada Martínez y Gómez Azpeitia 2015).

Calentamiento Global

Uno de los impactos ocasionados por la actividad humana y también por el uso de combustibles fósiles es el denominado calentamiento global que normalmente es provocado por el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (Ruddiman 2003). Literatura científica ha hablado acerca del efecto del calentamiento global sobre la biodiversidad. Como el impacto de las regiones polares que han sido gravemente afectadas, reduciendo los casquetes de hielo que provocan un aumento del nivel del mar causando importantes impactos en los ecosistemas (Nicholls y Klein 2005). A medida que se incrementa el dióxido de carbono en los océanos pueden provocar una acidificación en el mismo, afectando a los organismos sensibles a cambios de pH y la biodiversidad oceánica (Hoegh-Guldberg et al. 2007). Debido al calentamiento, numerosos lagos han experimentado también una estratificación prolongada, con disminuciones de la concentración de nutrientes en su capa superficial y un agotamiento prolongado del oxígeno en capas más profundas. Debido a la presencia de importantes impactos antropogénicos no relacionados con el cambio climático, no hay evidencia de tendencias coherentes relacionadas con el clima en otros parámetros de calidad del agua (por ejemplo, salinidad, patógenos o nutrientes) en lagos, ríos o aguas subterráneas (La Cuadra 2013).

En las últimas décadas la temperatura promedio anual en Honduras se ha incrementado mientras la precipitación ha tendido a reducirse. Los pronósticos climáticos indican que tales tendencias se mantendrán e incluso se acentuarán en los próximos años. Partiendo de los niveles actuales, diversos escenarios climáticos proyectan para este país aumentos en la temperatura entre

2 °C y cerca de 5 °C hacia el año 2100, mientras la precipitación podría reducirse entre 15% y 50%. La producción agropecuaria hondureña, al ser altamente dependiente del clima, se vería fuertemente afectada (Ordaz et al. 2010).

Efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso natural mediante el cual la atmósfera retiene calor y permite que la superficie del planeta tenga una temperatura adecuada para que le está puede tener vida. Este proceso ocurre gracias a la mezcla de GEI que componen la atmósfera. Los gases cumplen dos funciones permiten el paso de la radiación solar hasta la superficie terrestre y evita el escape de radiación de infrarroja lejano de regreso al espacio. Los principales gases de efecto invernadero propios de la atmósfera son el vapor de agua, el metano, el óxido nitroso, dióxido de carbono y el ozono y también existen gases de efecto invernadero creados por el hombre como hexafluoruro de azufre, los perfluorocarbonos e hidrofluorocarbono. La acumulación de estos gases naturales y antropogénicos (Rodríguez y Suazo 2017). Estos gases normalmente han llevado a un aumento en el efecto invernadero y por lo tanto al aumento del cambio climático y el calentamiento global actual.

El 12 diciembre de 2015 se adopta el Acuerdo de París el cual tiene por objetivo central reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo muy por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados. Además, el acuerdo tiene por objeto aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y una trayectoria resistente al clima (Del Fajardo Castillo 2018).

Entre el 2000-2010 las emisiones de GEI han incrementado, Se han analizado las emisiones por sectores donde el 35% corresponde al sector energético el 24% a la agricultura, silvicultura y otros, el uso del suelo, el 21% a la industria, el 14% al transporte, el 6% a la edificación y el 3% a los residuos.

Es extremadamente probable que las emisiones de gases de efecto invernadero en el siglo XX sean las causantes del calentamiento debido a su aumento tan acelerado en las últimas tres décadas previas.

Entre los impactos ya observados atribuidos al cambio climático pueden señalarse (Bardales 2017): Desplazamiento de los rangos de distribución geográfica de numerosas especies y cambios en los patrones fenológicos y en las interacciones entre especies. Efectos negativos en la producción agrícola, más comunes que los impactos positivos. Los impactos están afectando a los países independientemente de su grado de desarrollo (Ballester et al. 2006).

Desde mediados del siglo XX se han observado cambios en la frecuencia e intensidad de muchos eventos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios se han relacionado con la influencia humana, incluyendo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, el aumento en los niveles del mar extremadamente altos y el aumento en el número de episodios de precipitaciones intensas en varias regiones (Bardales 2017).

Cuadro 1

Principales gases de efecto invernadero conocidos por el protocolo de Kioto

Gas	Potencial de calentamiento global (GWP100)	Vida media	Concentración atmosférica	Origen
Dióxido de carbono (CO ₂)	1	1-173	73	Combustión de combustibles fósiles y biomásas, incendios forestales, etc.
Metano (CH ₄)	28.5	12.4	20	Producción pecuaria (fermentación entérica y estiércol), cultivo de arroz por inundación, desocupación de residuos orgánicos (compostera), emisiones fúngicas, etc.
Óxido nitroso (N ₂ O)	264.8	121	5	Producción pecuaria (fermentación entérica y estiércol), cultivo de arroz por inundación, desocupación de residuos orgánicos (composteras), emisiones fúngicas, fertilizantes, etc.
Perfluoro-carbonos (PFC)	1-20 000	2-50 00		Aerosoles y solventes, refrigerantes, producción de aluminio, producción y uso de halocarbonos, etc.
Hidrofluoro-carbonos (HFC)	1-14 000	1-1 700	1.9	Refrigerantes, extintores, petroquímicos, solventes en producción de espumas, aerosoles, producción y uso de halocarbonos, etc.

Gas	Potencial de calentamiento global (GWP100)	Vida media	Concentración atmosférica	Origen
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	26 087	3 200	0.3	Aislantes en transformadores de redes de distribución eléctrica, refrigerantes industriales, producción de metales (aluminio, magnesio y otros) metales, producción y uso de halocarbonos, etc.
Trifluoruro de nitrógeno (NF ₃)*	16 100	500	0	Fabricación de pantallas plasmas, microcircuitos electrónicos, células solares y láseres químicos. También es utilizado como alternativa al SF ₆ por tener GWP menor.

Nota: GWP (Global Warming Potential o Potencial Tomdo, *El NF, fue adicionado en la Fase II del Protocolo de Kioto, pero su distribución es menor al 0.1%

Las circulaciones atmosféricas-oceánicas

El desbalance energético del planeta provoca la formación de corrientes de aire en la atmósfera y corrientes marinas en los océanos que funcionan como cintas transportadoras de calor. Los océanos y la atmósfera retribuyen por lo que equilibran las temperaturas de la superficie del planeta dando a este un cambio climático (Rodríguez y Suazo 2017).

Circulación atmosférica

La circulación atmosférica normalmente es el movimiento de masa de aire en la atmosfera es decir que en contacto con la superficie terrestre la masa de aire se calienta y sube porque ya tiene una menor densidad, y normalmente se da un ciclo donde las masas calientes suben y las frías bajan dándole esto a una determinación de zonas climáticas mundiales, ya que su desplazamiento influye en los patrones de lluvia y cambios de temperatura (Rodríguez y Suazo 2017).

Impactos del cambio climático en 1998 a 2021

Las temperaturas han aumentado significativamente, por lo que causaron más precipitación, evaporación y tormentas más destructivas. Los daños materiales causados por fenómenos climáticos, por ejemplo, totalizaron 92.000 millones de dólares en 1998, lo que representa un aumento de 53% frente a la cifra de 1996, de 60.000 millones (IPS 1999).

Desde la década de los 90 en 1998 han señalado que los inviernos de Centroamérica han influido en el cambio climático de manera muy drástica, porque provocan mayor humedad relativa del aire y mayor frecuencia de lluvias, por lo que unidas aporta a una mayor adaptabilidad del patógeno estas condiciones han motivado una mayor incidencia del tizón tardío de la papa y algunas otras enfermedades. Los cambios climáticos tan drásticos hicieron un hábitat conveniente para el patógeno.(Smith et al. 2002)

El Huracán Mitch

Con el paso del huracán Mitch los países mayormente afectados fueron Honduras, Nicaragua, Guatemala y El Salvador antes del mismo la disponibilidad nacional de alimentos ya era deficiente, estimando un déficit per cápita de más de 200 kcal diarias, lo que llevaba a que grandes sectores de la población se encontraran una situación severa de inseguridad alimentaria (Smith et al. 2002). El paso de este huracán afectó grandemente la agricultura y a su suministro de granos básicos, principalmente de frijol. El huracán Mitch provocó pérdidas en la producción agrícola en todos los países de la región centroamericana pero principalmente en Honduras el costo total de pérdidas se estima en más de 2.3 miles de millones de dólares (Gallagher et al. 2019).

El Salvador, perdió aproximadamente el 15.5% de las cosechas de sus granos básicos entre el año 1998-1999, la pérdida de cosecha del frijol fue aproximadamente de 23.6%. En Nicaragua se perdió aproximadamente un área sembrada de producción de consumo interno principalmente arroz y frijol de un 27.3% en el año de producción de 1998-1999 se estima que se perdió el 50% de producción agrícola total, siendo más afectadas las cosechas de granos básicos con un 20% de maíz y 50% de frijol (FAO c2021). En el caso de Honduras se estima que perdió el 70% de su producción agrícola, entre granos básicos y productos de exportación como café y cultivos no tradicionales, la pérdida en la producción de frijol fue de más del 75% del total que se esperaba ya que tuvo un gran impacto el huracán Mitch en Centroamérica. Un aspecto importante de mencionar es que informes de preliminares mediante imágenes satelitales de análisis de la calidad de la vegetación en los países

afectados por el huracán, sugiere que se presentó alto impacto biológico en la región que compromete la producción agrícola futura (FAO c2021).

Los fenómenos como tormentas tropicales, huracanes, ciclones y tifones son asociados con la variabilidad de la lluvia por el clima o causas meteorológicas en Centroamérica la cual está influenciada por los centros de alta presión subtropical del Atlántico Norte, centros de baja presión, zonas de convergencia intertropical, ingreso de frentes fríos, migración de ondas tropicales del este y ciclones tropicales. Estos eventos extremos de lluvia generalmente se deriva de crecidas inundaciones afectando al país, causando así grandes epidemias afectando a la agricultura ya que ésta podría afectarnos distribuyendo patógenos que no había ninguna región a otra o beneficiar algunos patógenos brindándole condiciones para una mejor proliferación, también ayudando su evolución donde este es mutado y se acopla al nuevo ambiente en el que está habitando (Bardales 2017).

Cuadro 2

Histórico de eventos ciclónicos que han afectado a Honduras, periodo 1998 - 2020

Año	Tipo de evento	Nombre	Año	Tipo de evento	Nombre
1998	Huracán	Mitch	2009	Huracán	Ida
1999	Tormenta tropical	Katrina	2010	Tormenta	Agatha
2001	Huracán	Iris	2011	Tormenta tropical	Harvey
2005	Tormenta	Storm Gamma	2011	Huracán	Irene
2005	Huracán	Emily	2011	Depresión tropical	12/E
2005	Huracán	Beta	2016	Huracán	Earl
2005	Huracán	Adrián	2017	Huracán	Harvery
2005	Huracán	Wilma	2018	Tormenta tropical	Michael
2005	Huracán	Stan	2020	Huracán	Nana
2007	Huracán	Dean	2020	Huracán	Gamma
2007	Huracán	Félix	2020	Huracán	Delta
2008	Huracán	Paloma	2020	Huracán	Eta
2008	Tormenta tropical	Arthur	2020	Huracán	Iota

Nota: Elaboración propia (Ministerio de medio ambiente c2020a, c2020b)

Etapas de evolución de perturbación tropical a Huracán

Las perturbaciones tropicales son zonas de inestabilidad atmosférica que asociada a la existencia de un área de baja presión, en la cual propicia la generación incipiente de vientos convergentes cuya organización eventual provoca el desarrollo de una depresión tropical (Gobierno

de México c2021a). Las depresiones tropicales son originadas por los vientos se incrementan en la superficie, producto de la existencia de una zona de baja presión. Los vientos suelen alcanzar una velocidad sostenida menor o igual a 62 kilómetros por hora (Gobierno de México c2021a).

Se trata de tormentas que alcanzan una velocidad estimada de 63-118 km/h son tormentas con velocidad promedio del viento Alto alcanzando las velocidades mencionadas anteriormente. Además, es acompañada de una gran precipitación excediendo la capacidad del suelo provocando inundaciones leves de las poblaciones y cultivos (Gobierno de México c2021b).

Son tormentas que se unen llamándose de distintas formas debido en donde se originen, Los huracanes se forman en el océano Atlántico, los que se forman en el Océano Pacífico se denominan tifones mientras, los que se forman en el océano indico ciclones cada uno de estos tiene distintos nombres debido a donde se origina aunque también una característica de lo que se denominan los huracanes es la fuerza en como ellos llegan a tierra que puede ser categoría uno que normalmente tiene una velocidad de 119-153 km/h hasta la categoría cinco El cual tiene una velocidad de más de 250 km/h (Ministerio de medio ambiente de el Salvador c2020).

Efecto de las altas precipitaciones y vientos sobre la población de insectos

La precipitación y los vientos son factores que influyen directamente en la dinámica de poblaciones, tasa de reproducción y sobrevivencia. Al presentarse lluvias fuertes las plantas quedan expuestas a daños mecánicos en sus órganos lo que la hace más susceptible al daño por patógenos y plagas, así mismo, el daño generado a la población de arvenses dentro de un cultivo causa una redistribución en los hospederos de estas, migrando hacia plantas del cultivo. Adicionalmente, bajo estas condiciones se puede presentar una redistribución de población de plagas, siendo vectores de dispersión el agua y el viento (Quiroga 2015).

Sequía

La sequía se expresa como condición de déficit de humedad o agua, que resulta de la combinación de eventos meteorológicos, características físico-geográficas del territorio y la acción del humano sobre el medio. Se registran situaciones de sequía en el abastecimiento de agua para las ciudades, industrias, actividades agropecuarias, generación de hidroelectricidad, entre otras, así como en el contenido de humedad de la atmósfera (Duro Tamasiunas JM et al. 2002).

Cuadro 3

Irregularidades en el periodo de lluvias que han desencadenado en sequías, periodo 1991-2018

Año	Irregularidades en temporadas de lluvia
1991	Retraso en la temporada de lluvias, provocando sequía agrícola e hidrológica
1998	Retraso en el establecimiento de temporada de lluvias y déficit pluviométrico
2009	Canícula severa y prolongada
2012	Canícula severa y prolongada
2014	Canícula severa y prolongada
2015	Canícula severa y prolongada
2018	Canícula severa y prolongada

Nota: Elaboración propia. (Bardales 2017)

El corredor seco Centroamericano

Se trata de un tramo de tierra de 1.600 kilómetros de largo y de 100 a 400 kilómetros de ancho que concentra el 90% de la población de Centroamérica y las principales capitales de esta región geográfica. Además, azotado por una serie de sequías cíclicas estrechamente relacionadas con el fenómeno de El Niño, el llamado Corredor Seco está más que familiarizado con los fenómenos climatológicos extremos provocados por el cambio climático (Orgaz 2019).

Es una región en Centroamérica afectado particularmente a Guatemala, Honduras y El Salvador, Estos países están viviendo una de las sequías más grandes de estos últimos 10 años dejando pérdidas significativas al paso de los años por la falta de agua también así afectando a plagas y enfermedades e incluso ayudado a que algunos patógenos ahora sea más resistente a la sequía causando una mutación (Orgaz 2019).

Figura 1

Mapa de área incluidas que recorre el corredor seco en Centroamérica.



Fuente: FAO (Orgaz 2019)

Efectos de la sequía sobre la población de insectos

En algunos casos las condiciones de temperatura de la planta y déficit de agua influyen en la actividad de ovoposición o alimentación de los insectos, lo que genera una presión de selección de población de insectos sobre los cultivos bajo condiciones de sequía extrema. Algunos estudios han demostrado, que bajo condiciones de sequía las plagas que más se ven favorecidas son aquellas denominadas invasoras. De hecho, la creciente globalización del mercado de los últimos años, unida al aumento de las temperaturas, ha dado lugar a una situación extremadamente favorable para el desplazamiento y el establecimiento de las plagas, con el consiguiente aumento del riesgo de graves impactos en los bosques y los cultivos (Secretaría de la CIPF 2021). Se ha confirmado que insectos pertenecientes al orden Hemiptera y Thysanoptera, tales como los chinches y trips, son los más

beneficiados bajo estas condiciones, puesto que el aumento en la temperatura favorece la tasa reproductiva de estos insectos. En general eventos extremos de clima pueden incidir sobre cambios en la dispersión de insectos o plagas exóticas y alteración en la población de insectos benéficos controladores de plagas (Quiroga 2015).

Un estudio realizado en Cuba, identificó el efecto de altas poblaciones de insectos como consecuencia de una sequía prolongada. Tales como, mosca blanca *Bemisia Tabaci* MThrips *Frankliniella spp.*, minadores de hojas *Liriomyza trifolii*, psílido de los cítricos *Diaphorina citri*, salto de hoja del maíz *Dalbulus maidis*, gusano gris del maíz *Agrotis spp* incrementaron su población en cultivos debido a las condiciones, adicionalmente algunos insectos son vectores de virus que puede generar una enfermedad al cultivo, perforadora del café *Hypothenemus hampei* en condiciones de alta humedad relativa y temperaturas favorables la actividad de las hembras y la cochinilla harinosa de la papaya *Paracoccus marginatus* tiene una afección sobre la población de los insectos controladores o enemigos naturales (Quiroga 2015).

Fenómeno del Niño

El fenómeno del Niño es una anomalía consistente en un calentamiento o aumento de la temperatura promedio en la superficie del Mar en el Océano Pacífico, además los vientos que soplan del Este cerca de la superficie marina se debilitan y las lluvias que por lo general se producen sobre Australia, se trasladan al centro del Océano Pacífico sobre las Polinesias. El Niño y su interacción con la circulación de los vientos y la circulación marina influyen mucho para que se formen menos huracanes en el Océano Atlántico y más huracanes en El Océano Pacífico cerca de Guatemala y México (CENAOs 2016).

Fenómeno de la Niña

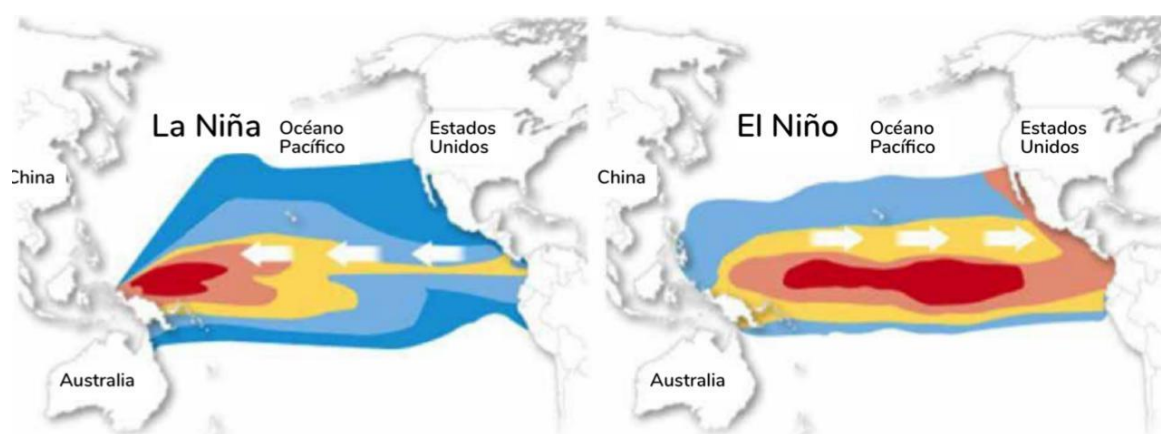
El fenómeno de la Niña es un enfriamiento o disminución de la temperatura promedio en la superficie del Mar en el Océano Pacífico, los vientos que soplan del Este se aceleran sobre la superficie

marina y las lluvias sobre Australia se intensifican. La Niña y su interacción con la circulación atmosférica y las corrientes marinas favorecen la formación de más huracanes en el Océano Atlántico y menos huracanes en El Océano Pacífico cerca de Guatemala y México (CENAOS 2016).

En Honduras, por lo general El Niño produce una canícula más intensa y larga en los departamentos de Choluteca, Valle, El Paraíso, Francisco Morazán, La Paz y Ocotepeque y en el sur de los departamentos de Comayagua, Intibucá y Lempira, lo que se significa que habrá más sequías, especialmente desde finales de junio hasta principios de septiembre. Mientras que cuando estamos bajo la influencia de la Niña llueve más, la Canícula es más corta y en algunas ocasiones no se presenta en la mayor parte del país como en el 2016 (CENAOS 2016).

Figura 2

Corriente cálida de El Niño y corriente fría de La Niña.



Nota: Las flechas representan el movimiento de las corrientes en los fenómenos de El Niño y de la Niña. Las coloraciones rojas y naranjas denotan aguas a mayor temperatura; mientras que las coloraciones celestes y azules representan temperaturas más bajas (Bardales 2017). Tomado de (Bardales Espinosa et al. 2019)

En la temporada de 1998 fueron 14 ciclones nombrados y durante las temporadas de 2010 y 2011 fueron 19 ciclones en cada una. En la cuenca este del Pacífico norte (con promedio de 15 ciclones nombrados) no se logran discernir plenamente los efectos de aumento o disminución de actividad ciclónica con relación al ENOS. Lo más destacable es la amenaza del paso de ciclones sobre Centroamérica y su reactivación o formación sobre los litorales de El Salvador, Guatemala y la zona

ciclo genética del golfo de Tehuantepec. (Alfaro Martínez 2005) sugiere que la mayor fuente de variabilidad de la actividad ciclónica en esta cuenca depende de la ODP (Bardales Espinosa et al. 2019).

Cuadro 4

Fenómeno de la niña y el niño en el periodo de 1998 a 2021

Año	Fase Predomínate	Clasificación	Año	Fase Predomínate	Clasificación
1998-1999	Niña	Fuerte	2009-2010	Niño	Moderado
1999-2000	Niña	Fuerte	2010-2011	Niña	Fuerte
2000-2001	Niña	Débil	2011-2012	Niña	Moderado
2002-2003	Niño	Moderado	2014-2015	Niño	Débil
2004-2005	Niño	Débil	2015-2016	Niño	Muy Fuerte
2005-2006	Niña	Débil	2016-2017	Niña	Débil
2006-2007	Niño	Débil	2017-2018	Niña	Débil
2007-2008	Niña	Fuerte	2018-2019	Niño	Débil
2008-2009	Niña	Débil	2020-2021	Niña	Moderado

Nota: Adaptado de (ONI 2021)

Casos del efecto del cambio climático sobre plagas y enfermedades agrícolas

Debido a las alteraciones en las condiciones climáticas ha sucedido casos que han alterado el ciclo de la fitopatología entre estos están; periodos de extensos de sequias, al incrementar la temperatura, las exposiciones de altas concentraciones de CO₂, precipitaciones fuertes. Se ha observado que la broca se reproduce en mayor proporción en los frutos caídos, a comparación con las épocas donde se presenta mayor precipitación. Los áfidos, han incremento de 1 a 5 ciclos de vida por temporada de altas temperaturas, por ejemplo, la presencia de plagas como *Diabroteca virgifera* (gusano del maíz), y áfidos de la soya como *Aphis glucines*. El aumento de la precipitación suele favorecer en ocasiones el desarrollo de fusariosis. En países como México en el año 2002 el cual fue año niño, coincidió con epidemias de mosca del mediterráneo *Ceratitis capitata* y cochinilla rosada *Maconellicoccus hirsutus*. En el estado de Yucatán, México experimento una sequía anómala durante el periodo de 2009 a 2011 creando condiciones ideales para la enfermedad de HLB, causada por la bacteria *Candidatus Liberibater asiaticus* (Quiroga 2015).

Dispersión aérea de patógenos a nivel mundial y escalas continentales y su impacto en las enfermedades de las plantas

La dispersión a larga distancia por medio del aire es una estrategia de supervivencia muy importante para muchos organismos, lo que permite su dispersión y colonización a nuevos territorios logrando una epidemia. Normalmente los hongos patógenos de las plantas son los que se dispersan por medio del viento, por sus esporas que pueden viajar por cientos o miles de kilómetros llevadas por los vientos provocando la propagación de varios hongos que han afectado a la agricultura a nivel continental o global (Brown y Hovmøller 2002).

En la actualidad la necesidad de controlar estas enfermedades ha sido un gran estímulo para investigaciones recientes sobre la teoría de dispersión a larga distancia y los propios hongos ilustran algunos de las consecuencias que mejor las caracteriza por su dispersión a largas distancias aéreas (Brown y Hovmøller 2002).

Estudios realizados durante el último medio siglo por Brown y Hovmoller en 2002 mencionan que las plantas mejoradas en cuarentena reducen el movimiento de diferentes patógenos. Gracias a esto se han detenido los avances de enfermedades perjudiciales como la roya en distintas cafetaleras, ya que las esporas se pueden dispersar en el aire. La limitada diversidad genética de ciertos cultivos modernos aumenta el riesgo de la propagación mundial de enfermedades, muy diferente a las especies silvestres o autóctonas de cierta zona. Por ejemplo, lo que es el café y el plátano de los cual clones únicos propagados por los trópicos, son susceptibles a la roya del café y la sigatoka negra (Brown y Hovmøller 2002).

De manera más general el intercambio internacional de germoplasma hace una característica del Fito mejoramiento desde el siglo XIX y se ha acelerado en las últimas décadas por lo que varios genes resistentes ahora son utilizados a escala mundial (Plucknett 1992). Además, existen patógenos capaces de vencer las resistencias que están actualmente y pueden causar enfermedades donde quiera que se dispersen sus esporas. Una importante clase de hongos resistentes son los biótrosos

obligados que tienen interacciones específicas gen por gen, como genotipo de patógenos de manera que una sola mutación puede volver virulento a un patógeno. Discutiendo el papel de la dispersión por esporas aéreas, estas pueden propagar enfermedades en las plantas con una distancia aproximada de 500 km o más (Brown y Hovmøller 2002). Así mismo, las nuevas invasiones, el establecimiento de periodos más largos de enfermedades, la discusión de fenómenos del hospedero que han limitado especies y diversidad de genética sobre enfermedades con respecto a los patógenos, han ayudado a la dispersión de las enfermedades. La epidemiología y genética discuten la relación entre dispersión de patógenos y la adaptación que tienen estos para albergar cultivos (Brown y Hovmøller 2002).

Invasión de nuevo territorio

La invasión de nuevos territorios se puede dar de dos formas de dispersión aérea que propagan los patógenos a lugares distantes de la fuente de origen. El primer tipo implica el transporte de esporas a largas distancias, incluso puede pasar continentes en un solo paso y el otro es una expansión gradual, aunque posiblemente pueda ser rápido, del rango de una población de patógenos dentro de un continente (Brown y Hovmøller 2002).

En una amplia gama de enfermedades el inóculo se transporta de un continente a otro por medios distintos al viento, pero la posterior expansión del patógeno a través de la nueva área ha sido por esporas en el aire. La dispersión intercontinental de la enfermedad de la Sigatoka negra, que en los últimos 40 años ha devastado los cultivos de banano y plátano en todo el mundo probablemente ocurrió a través del transporte de plantas infectadas, pero a partir de entonces, la dispersión dentro de los continentes ha sido por vía aérea (Alvarez et al. c2021).

Dinámica poblacional de eventos raros

Las invasiones de patógenos de un solo paso son más notables porque son diferentes a los de una expansión gradual. Las invasiones biológicas generalmente se han moderado mediante algunas

funciones de expresión en las que la cola de distribución de probabilidad de los propágulos está acotada experimentalmente, de modo que la tasa de expansión de la población es constante (Roiloa et al. 2014). De esta manera se demuestra que las invasiones de ciertos patógenos pueden ser muy perjudiciales en un cultivo, ya que estos se encuentran susceptibles en campo. Los patógenos de las plantas, provienen de modelos que involucren una dispersión delimitada no exponencial, en la que una proporción relativamente alta de propágulos se dispersan a larga distancia y la expansión de la población acelera el aumento de diseminación de diferentes fuentes (Brown y Hovmøller 2002).

Extinción local y Recolonización

Existen patógenos que no pueden sobrevivir en desechos de plantaciones anteriores por lo que causa una disminución en su supervivencia. Un ejemplo claro son los hongos biotróficos obligados que no pueden sobrevivir en los desechos de las plantaciones o en el suelo, por lo que deben sobrevivir en una etapa inactiva. Generalmente se reproducen de manera sexual o infectando hospederos alternos que se encuentren disponibles. El ciclo de extinción-recolonización pueden implicar una dispersión en un área de 500 a 2000 km. Como una estrategia de supervivencia, los patógenos pueden realizar un proceso de migración similar a la de las aves e insectos cuyo rango de verano es inhóspito en invierno. Para todos estos organismos la atmósfera es una vía para el movimiento rápido entre los rangos de verano, invierno ya que es una ventana donde se pueden dispersar y recolonizar algunos hongos que ya no estaban en sus condiciones para desarrollarse (Brown y Hovmøller 2002).

La dispersión aérea de patógenos tiene un papel muy importante en la recolonización debido a la dinámica de la población que tiende a ser más predecible que en el caso de invasiones de nuevos territorios porque se dispersa un mayor número de esporas y la distancia involucradas son generalmente más cortas que una distancia más larga, por lo tanto, la recolonización depende fundamentalmente de un tejido disponible y susceptible y, por lo tanto, la composición de la población de patógenos difiere sustancialmente de un año a otro, lo que a veces hace que la resistencia de un huésped se vuelva ineficiente (Brown y Hovmøller 2002).

Adaptación al hospedero resistente

La dispersión de esporas a larga distancias puede vencer la resistencia de algunas plantas previamente mejoradas contra algún patógeno, las invasiones de patógenos, la dispersión de genotipos virulentos puede tener éxito incluso cuando la densidad de huéspedes susceptibles es baja. Cuando un gen de resistencia se usa ampliamente, la mutación a virulencia en un solo genotipo de patógeno puede significar que cultivos previamente resistentes se vuelven susceptibles en grandes áreas. De acuerdo con la predicción de que eventos inusuales pueden tener un efecto desproporcionado en la dinámica de la población. Los clones virulentos pueden iniciar epidemias locales si se dispersan con la prevalencia a los vientos o en su contra. Los clones virulentos pueden luego diversificarse por mutación adicional o por recombinación con otros genotipos (Brown y Hovmøller 2002).

¿Qué tan inusuales son los patógenos de los cultivos?

La dispersión a larga distancia área no es exclusiva de los hongos patógenos de las plantas de cultivo, pero estas especies muestran sus consecuencias para la distribución de la población y la genética en su forma más extrema. Cuatro puntos críticos, comunes tanto a las invasiones de nuevos territorios como a la adaptación a nuevas resistencias, son que: estas especies están adaptadas para LDD; pueden reproducirse clonalmente; son muy específicos para especies o genotipos de hospedadores particulares de manera única, los seres humanos con frecuencia crean nuevos nichos para ellos mediante el comercio mundial de especies hospedadoras o mediante la liberación generalizada de resistencias efectivas en nuevos cultivares (Brown y Hovmøller 2002).

Predecir los efectos del cambio climático sobre los enemigos naturales de las plagas agrícolas

El cambio climático es un factor puede tener diversos efectos en los enemigos naturales de las especies de plagas. Por lo que revisaremos los efectos y sus posibles impactos en el control de plagas. Algunos experimentos indican que los niveles más altos de CO₂ generalmente aumentan la

productividad de las plantas. Además, estos efectos pueden ser contrarrestados por los efectos que ahora existen en el ambiente por el cambio climático como el aumento de temperatura reducción de disponibilidad de agua y entre otros. Incluso ya existen evidencias de estos factores están teniendo un impacto negativo en la productividad de los granos y otros cultivos en lugar de hecho positivo (SEAE 2004). Además de tener efectos directos sobre la productividad de las plantas, el cambio climático también puede influir en la productividad a través de efectos indirectos mediados por cambios en plagas y enfermedades (Thomson et al. 2010).

Incrementos de CO₂ atmosférico, los cambios en la precipitación han disminuido y particularmente los aumentos de temperatura alterarán la fenología, que influye en el crecimiento y la abundancia de herbívoros, y afecta indirectamente la abundancia de presas y huéspedes de enemigos naturales. Un cambio en la fenología, incluido el momento de la germinación de la semilla, la ruptura de la latencia o el brote de yemas podría disminuir la sincronización entre los herbívoros y sus huéspedes. Para los insectos del bosque, el desempeño de las larvas de insectos herbívoros depende del tipo de tejido vegetal disponible para el consumo (Thomson et al. 2010).

Además de verse afectados por la sincronización con las plantas hospedantes, la abundancia de herbívoros y el estado físico también pueden verse influidos por cambios en los tejidos vegetales en respuesta al CO₂ y tal vez precipitación. En general, niveles elevados de CO₂ reducir el valor nutricional de las plantas, incluida la disminución del nitrógeno, lo que al aumento de las tasas de consumo de plantas en algunos gremios de plagas (Dyer et al. 2013). Esto podría resultar en un mayor nivel de daño a las plantas porque las plagas tienen que consumir más tejido vegetal para adquirir niveles similares de nutrición; sin embargo, las respuestas son variables y pocos estudios han mostrado cambios significativos en el tamaño de las poblaciones de insectos herbívoros (Thomson et al. 2010).

Cambios de distribución en plantas, huéspedes y enemigos naturales

La eficacia de los enemigos naturales en el control de plagas puede verse reducida por cambios en la distribución de cultivos, huéspedes y los propios enemigos. Se predice que los rangos de cultivos se moverán a medida que ocurra el cambio climático, y los herbívoros pueden rastrear estos cambios (Nelson 2009). El resultado dependerá en parte de la capacidad de los enemigos naturales para expandir simultáneamente su alcance o de las nuevas poblaciones de enemigos naturales para controlar la plaga en su alcance ampliado. Plantas pueden moverse fuera del rango de sus plagas herbívoras, pero los herbívoros con altas tasas de movimiento deberían poder rastrear los cambios climáticos (Thomson et al. 2010).

Respuestas térmicas y de desecación

La medida en que las plagas herbívoras pueden rastrear los cultivos y los enemigos naturales, pueden rastrear los cambios en los huéspedes herbívoros, dependerá de su resistencia relativa a los extremos térmicos, así como el movimiento (Thomson et al. 2010). Los parasitoides a menudo pueden desarrollarse en un amplio rango térmico que afecte su comportamiento, aunque se han completado pocos estudios sobre las respuestas a los extremos térmicos a corto plazo. Dentro de una etapa del ciclo de vida, la resistencia a los extremos en los parasitoides puede aumentar mediante la aclimatación después de la exposición a condiciones no letales. La resistencia también se puede aumentar si parasitoides entran en diapausa que generalmente se asocia con un alto nivel de resistencia a los extremos térmicos y la desecación. Por el contrario, la invasión podría prevenirse si las condiciones impiden la inducción de la diapausa, que es una de las razones por las que el depredador coccinélido generalista invasivo *H. axyridis* puede no haberse establecido en las Azores (Thomson et al. 2010).

La temperatura tiene un gran efecto sobre la fenología de los herbívoros y los cambios de temperatura pueden alterar la sincronía entre los herbívoros y sus enemigos naturales, la velocidad

de desarrollo de los herbívoros generalmente aumentará con el cambio climático a menos que se vea influenciada por una nutrición deficiente (Thomson et al. 2010).

Las temperaturas más altas también pueden permitir un aumento en el número de generaciones por año en especies, denominado voltinismo debido a un desarrollo más rápido o al momento alterado de la eclosión de los huevos (Gerard et al. 2013). Las temporadas de crecimiento más largas debido a condiciones más suaves pueden permitir más generaciones de pulgones y el barrenador europeo del maíz. La diapausa en los insectos se asocia típicamente con una interacción entre la duración del día y la temperatura y patrones alterados de diapausa podrían influir en el número de generaciones (Thomson et al. 2010).

Cambios mediados por la administración

Las empresas agrícolas ya están comenzando a administrarse de manera diferente para hacer frente al aumento de las temperaturas, la reducción de la disponibilidad de agua y el aumento de la variabilidad climática (Gerard et al. 2013). Las nuevas estrategias de manejo adaptativo tienen impactos potenciales sobre los enemigos naturales. Las precipitaciones se han vuelto menos predecibles en muchas regiones y el agua de riego está menos disponible. Esto significa que a menudo se aplica menos agua a los cultivos y de una manera más específica (Thomson et al. 2010). El impacto de este cambio en la práctica no es bien conocido. Hay impactos negativos de la sequía en la abundancia de depredadores, incluidas arañas y escarabajos, mientras que los habitantes del suelo como la familia *Carabidae* pueden diferir entre los tratamientos de riego y de control (Nicholls 2008).

Potencial evolutivo

Las predicciones sobre los cambios en los herbívoros y enemigos naturales bajo el cambio climático normalmente asumen que las respuestas de desarrollo, los umbrales térmicos y otras formas de cambios ambientales los ajustes son estáticos y no pueden evolucionar (Nicholls 2008). Cuando se utilizan enfoques correlativos para predecir cambios en la distribución de organismos, se supone que

los límites climáticos son fijos. Los umbrales térmicos pueden ser plásticos como consecuencia de la aclimatación y la diapausa o quiescencia, pero no se admite la posibilidad de que los umbrales evolucionen debido a la selección impuesta por el cambio climático (Thomson et al. 2010).

Sin embargo, existe una creciente evidencia de cambios evolutivos en los insectos expuestos al cambio climático. Esto incluye cambios en marcadores genéticos y rasgos fenotípicos en generalizados (Thomson et al. 2010).

Observaciones finales

Los efectos del cambio climático en el control de plagas serán complejos, particularmente cuando los cultivos se trasladen a nuevas áreas y los herbívoros / vectores de enfermedades escapen de los enemigos naturales al menos temporalmente. Una vez que se conozca lo suficiente sobre los efectos del cambio climático en los diferentes componentes que interactúan de las redes tritróficas y, en última instancia, en el rendimiento de los cultivos, podrían hacerse posibles predicciones útiles para la planificación futura sobre los efectos del cambio climático. Al predecir los efectos directos del cambio climático, es necesario considerar la flexibilidad fenotípica y genotípica de herbívoros y parasitoides y las interacciones entre especies. Muchos de los intentos actuales de predecir nuevas distribuciones probables se basan en escenarios de cambio climático que utilizan distribuciones actuales combinadas con variables ambientales actuales. Un marco predictivo más útil radica en el desarrollo de modelos basados en el conocimiento de sus procesos fenológicos, especialmente de los insectos y sus plantas hospedantes (Thomson et al. 2010).

Las tasas de movimiento y los cambios de gestión en las granjas y en el paisaje circundante complicarán las predicciones, pero podrían incorporarse en modelos más complejos. Se requerirán estudios longitudinales para probar las predicciones y afinar los modelos predictivos. Estos deben establecerse para plagas clave y complejos beneficiosos en los agroecosistemas locales. Experimentos ambientales controlados. Puede informar los efectos probables del aumento de la temperatura y / o

CO₂ para insectos y plantas. Sin embargo, los seguimientos a largo plazo de la demo (Thomson et al. 2010).

Epidemiología

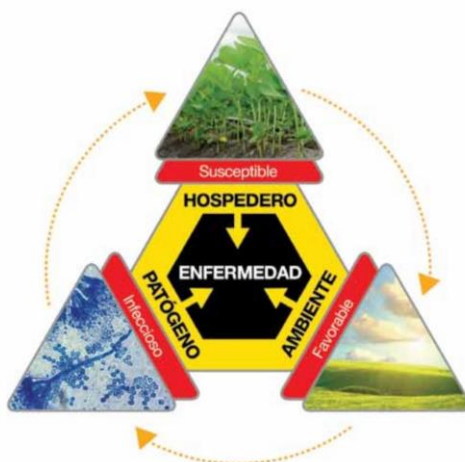
La Epidemiología Agrícola, es la ciencia que estudia los diversos factores que afectan el proceso y diseminación de las enfermedades en poblaciones de plantas cultivadas. En consecuencia, una epidemia ocurre cuando se presenta cualquier incremento en la cantidad de enfermedad, en una población de plantas a través del tiempo. La enfermedad puede ser causada por un hongo, una bacteria, un virus, un viroide, un nematodo, un micoplasma, una rickettsia, un actinomiceto, un protozooario o una planta parásita (Achicanoy López 2000).

La Pirámide de las Enfermedades

En el caso de enfermedades infecciosas de las plantas, hay ciertas condiciones que se deben cumplir para el desarrollo de la enfermedad. Para una mejor comprensión, se plantea el triángulo de la enfermedad, el cual resume las condiciones que se deben de tomar en cuenta para evitar una epidemia (Figura 3). Este triángulo muestra que debe existir tres condiciones que deben ser indispensables para que el patógeno pueda desarrollarse y proliferarse. Las tres condiciones son: el agente patógeno, un huésped susceptible y condiciones ambientales (Helms y Rothman 1992).

Figura 3

Triángulo de la enfermedad: la enfermedad depende de las interacciones entre la planta hospedera, el patógeno y el ambiente



Nota. Tomado de (Helms y Rothman 1992)

Factores que influyen en la emergencia de hongos patógenos

Los patógenos vegetales emergentes también emergen en nuevas regiones a través de mecanismos naturales de dispersión. Por lo tanto, los patógenos fúngicos que infectan partes de plantas aéreas se dispersan con frecuencia a través de esporas transportadas por el aire, que pueden ayudar a su colonización a nuevas regiones. La dispersión de esporas a larga distancia es clave para la supervivencia de ciertos hongos biotróficos obligados, que no pueden vivir en el suelo o los restos de plantas y deben sobrevivir en un estado inactivo o restablecer la población cada temporada a partir de fuentes externas. La dispersión de esporas es a menudo esencial para el restablecimiento, pero la dispersión es exitosa solo si hay un huésped susceptible en la región objetivo y condiciones ambientales favorables. Desafortunadamente, la diversidad genética reducida de los cultivos modernos tiende a aumentar las posibilidades de éxito de la dispersión aérea global de esporas (Corredor-Moreno y Saunders 2020).

Las alteraciones en las condiciones climáticas asociadas con el cambio climático pueden hacer que los patógenos de las plantas resurjan como amenazas significativas, ya que los patógenos

inactivos o los que estaban bajo control reaparecen y / o se adaptan a nuevas regiones geográficas, lo que da lugar a brotes graves. Se ha sugerido que inviernos más suaves, temperaturas más altas y temperaturas nocturnas más altas podrían aumentar la esporulación y la agresividad de los hongos foliares (Harvell et al. 2002). Por ejemplo, las reducciones en la amplitud térmica diurna disminuyeron el período de latencia de la roya del café en América Central y del Sur. Junto con factores económicos, como el uso de cultivares susceptibles como resultado de la alta inversión inicial necesaria para cultivar el reemplazo, las precipitaciones variables y las condiciones climáticas extremas provocaron brotes de roya del café en 2008-2013 que afectó directamente los medios de vida de miles de pequeños agricultores (Corredor-Moreno y Saunders 2020).

Importancia de la epidemiología en agricultura

La agricultura contiene una densidad muy alta de plantas genéticamente uniformes que pueden desencadenar una rápida especialización de cultivos patógenos y facilitar la rápida aparición y propagación de patógenos. Debido a las prácticas agrícolas modernas, la diversidad de germoplasma se ha reducido a nivel mundial y los cultivares de alto rendimiento se han seleccionado especialmente y se han plantado ampliamente por su valor agronómico. Esto favorece la aparición de patógenos de cultivos 'domesticados' que evolucionan rápidamente y son más virulentos que sus ancestros silvestres. Las poblaciones grandes y densas de huéspedes y patógenos también promueven la infección por diferentes patógenos o diferentes cepas del mismo patógeno, lo que aumenta la virulencia del patógeno y la probabilidad de transferencia horizontal de genes (Corredor-Moreno y Saunders 2020).

Un ejemplo en el que las prácticas agrícolas modernas han facilitado la propagación de patógenos es el caso de *Zymoseptoria tritici*, el agente causal de *Septoria tritici* Mancha (STB). El STB causa pérdidas significativas de trigo en las zonas templadas y es la principal enfermedad foliar del trigo en la mayoría de los países de Europa occidental. Los altos grados de susceptibilidad del hospedador han aumentado el tamaño de la población de *Z. tritici*, promover un flujo genético

sustancial entre cepas. Además, los grandes tamaños de población junto con la recombinación sexual pueden causar cambios masivos en las poblaciones de patógenos, que puede conducir rápidamente a la evolución de insensibilidad a los fungicidas. En consecuencia, la diversidad en el agroecosistema a través de cultivos, la rotación y la siembra heterogénea de cultivares es crucial para reducir la aptitud general de los patógenos y obstaculizar su capacidad para superar rápidamente la resistencia del huésped y la sensibilidad a los fungicidas (Corredor-Moreno y Saunders 2020).

***Mycosphaerella fijiensis* Sigatoka**

La sigatoka negra como se conoce comúnmente fue reportada por primera vez en 1972 en Centroamérica, Honduras. Después de los primeros reportes, esta enfermedad se extendió hacia los países vecinos empezando por Belice en 1975, Guatemala en 1977. Para el año 1979 la dispersión fue más agresiva debido a los cambios en el clima, causados principalmente por una serie de huracanes que pasaron por Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica. El Huracán Greta, David y Frederic provocaron la diseminación en Panamá en 1981 (Benavides Lopez [sin fecha]).

Esta enfermedad ataca de una forma muy agresiva bajo ciertas condiciones climáticas tales como precipitaciones por encima de los 1.400 mm anuales, humedad relativa alta >80 % y temperatura promedio entre 23 °C a 28 °C. Incluso las condiciones climáticas en las bananeras de Costa Rica son las más adecuadas para el desarrollo de la enfermedad de la sigatoka. La dispersión de las ascosporas ocurre por el viento el cual puede recorrer una distancia de 100 Km, también ocurren colonizaciones por medio de salpicaduras infectando hojas en desarrollo y hojas desplegadas. Las concentraciones en el medio ambiente son de 10 a 100 veces mayor a los conidios porque su dispersión es más rápida. El proceso de germinación ocurre en un tiempo menor a dos horas, posteriormente la penetración del tubo germinativo por la vía estomática ocurre durante una semana, incluso la viabilidad de las ascosporas puede ser mayor a 60 días. Además, debemos de tomar en cuenta la exposición aproximada de 6 horas a la radiación ultravioleta 250 a 270 nm y las altas

temperaturas >30 °C, debido a la desnaturalización de las proteínas presentes en la pared de las esporas del patógeno (Murillo Salas 2015).

Hemileia vastatrix Roya del café

El hongo la cual empezó a aparecer en América en 1970 el cual fue registrado en Brasil, en 1986 ya había alcanzado a infectar casi a la mayoría de Suramérica y Centroamérica los cuales fueron invadidos por la enfermedad: 1979, El Salvador; 1980, Honduras y Guatemala pudo ser causada por Tormenta tropical Hermine; 1981, Chiapas, México; 1983, Costa Rica (Avelino y Rivas 2014).

Un análisis general de los vientos transatlánticos mostró que *H. vastatrix*. Las uredosporas pueden haber sido transportadas desde Angola, donde se reportó por primera vez la roya del café en 1966, a Bahía en Brasil en 1970, aunque no se pudo excluir el transporte en plantas enfermas (Bertrand y Rapidel 1999)

Una epidemia de roya presenta tres fases la cuales son identificables en procesos denominados policíclicos. Se encuentra una fase lenta con infección de unas pocas hojas, posteriormente una fase rápida o explosiva y una fase terminal o máxima (Cárdenas López 2005). En este caso es necesario tomar en cuenta tres factores fundamentales, como lo es el hospedero, patógeno y el ambiente (Cárdenas López 2005). Estudios han confirmado que, en el aumento de producción, provoca una gran demanda de nutrientes por lo tanto existe una estrecha relación con el nivel de infección con la roya del café, dejando a la planta de café más propensa a la roya. Instituciones han logrado crear algunas variedades resistentes a *Hemileia vastatrix* las cuales se dividen en dos, resistencia completas es originada por la existencia de genes específicos en una planta que impide que las esporas puedan penetrar la hoja de café logrando con ello que no ocurra ningún infección en el tejido interno de las hojas haciendo imposible la formación de manchas translúcidas o lesiones con esporas de color anaranjado, la resistencia incompleta es causada por genes no específicos que no impiden la penetración del esfuerzo en la hoja pero si limitan o dificultan la colonización de hongos

en los tejidos internos la hoja, por lo que prolonga el tiempo y la formación de esporas en las lesiones provocadas por la enfermedad es menos (Mora Aguilera y Valencia Morales 2016).

Considerando que el ciclo de vida de la rodilla sea de 30 días es importante saber que únicamente se hace visible a partir del día 27 del ciclo cuando ha transcurrido el 90% del tiempo de vida y ya empezado a reiniciar su ciclo reproduciéndose y dispersando sean las partes de la plantación e incluso a otras partes de la región. En la población mundial de *Hemileia vastatrix*, Se ha reportado de la existencia de 49 diferentes tipos de razas fisiológicas, considerando así más la probabilidad de infección de plantas de café haciendo al hongo más resistente y más agresivo (Mora Aguilera y Valencia Morales 2016).

Algunos factores ambientales influyen en el desarrollo del proceso de germinación de las esporas la cantidad de horas que permanece suficientemente mojada la hoja, sea por lluvia rocío o condensación, entre un rango de temperatura de 18 a 28 °C son los factores climáticos que influyen aún rápido desarrollo de la enfermedad, por lo tanto, las regiones cálidas favorecen el enfermedad mientras que las regiones más frescas, reduce las horas favorables para la infección limitando de este modo que la enfermedad se exprese con mayor severidad (Virginio Filho y Astorga Domian 2015).

La lluvia y el viento juegan un papel muy importante ya que, en el desarrollo de la enfermedad, esto favorece la germinación de las esporas, y también favorece la dispersión de las esporas que flotan en el aire decir minándolas a grandes distancias por otra parte, las gotas de lluvia favorecen la dispersión dentro de la plantación ya que el impacto de la gota en la hoja provoca una salpicadura la cual hace que las esporas infecten otras hojas (Canet Brenes et al. 2016). Otros factores importantes de transporte podrían ser insectos, animales y algunos hombres principalmente en etapa de recolección del café cuando se interactuar más con la plantación.

Guerra de las plantas y patógenos en un clima cambiante

Las enfermedades de las plantas pueden tener consecuencias económicas y / o devastadoras. Consecuencias ecológicas globales. Algunas de las enfermedades de las plantas más infames, por

ejemplo, el tizón de la papa en Irlanda en la década de 1840 y el tizón del castaño en EE. UU. En la década de 1900, dieron lugar a muertes y macizos humanos, migraciones y cambios radicales en el paisaje. No solo persisten muchas enfermedades de las plantas durante siglos, sino que siguen apareciendo otras nuevas en el mundo. Se han proyectado estimaciones de pérdidas de producción directa de los principales cultivos debido al estrés biótico entre y 40% (Velásquez et al. 2018).

No todas las enfermedades son iguales y reacciona igual a los cambios de clima. Algunos patógenos vegetales tienen efectos socioeconómicos más devastadores que otros, en parte debido a las distintas especies de cultivos del hospedero que se infecta éstos pueden tener distintos impactos en la economía. Patógenos que comúnmente infectan a las plantas son diversos, que van desde intracelulares virus y bacterias aquellos que viven extracelular mente, incluyen otras bacterias hongos oomicetos y nematodos. Depende sobre cómo los patógenos adquieren sus nutrientes, se pueden clasificar en biotrofos o necrótrofos normalmente matan a las células del huésped para liberar los nutrientes. Los necrótrofos también suelen vivir como saprofito. En la naturaleza, la que Sición de nutrientes de patógenos abarca una gran variación desde la biotrofia a la necrotrofia, muchos patógenos vegetales son hemibiotrofos, mostrando un biotrófico inicial fases antes de matar al anfitrión (Velásquez et al. 2018).

Los patógenos y las plantas no interactúan de forma aislada. Como es el famoso concepto del triángulo de enfermedad en la fitopatología destacando la interacción entre las plantas, patógenos y el medio ambiente. Para que ocurra una enfermedad una planta huésped susceptible, un patógeno virulento, se requiere las condiciones ambientales adecuadas ya que carecen de condiciones favorables para cualquiera de estos tres factores resulta una falta de desarrollo de la enfermedad el efecto del medio ambiente variable en los patógenos y las plantas pueden tener resultados orales neutros o negativos sobre las enfermedades de las plantas. Tanto como los patógenos como las plantas tiene una óptima condición ambiental para su crecimiento y reproducción ya que sin estos factores las condiciones de crecimiento estarían afectadas rechazando su crecimiento y su

reproducción sin generar ningún tipo de brote en la planta. Cuando se desvían las condiciones ambientales a partir de éste el óptimo de la enfermedad, menos síntomas de la enfermedad ocurren en la planta ya que las condiciones ambientales no son las favorables para la enfermedad o patógeno (Velásquez et al. 2018).

Efectos del cambio climático sobre los cultivos

El fenómeno del aumento de las temperaturas medias del planeta, conocido como "calentamiento global", se considera actualmente uno de los problemas más preocupantes relacionados con el cambio climático. La rapidez con la que se manifestó este fenómeno, sus efectos catastróficos sobre la vida planetaria y las condiciones meteorológicas (aumento de la intensidad y frecuencia de tormentas, sequías, inundaciones, olas de calor o frío) son dramáticas, hecho que constituye uno de los principales temas de debate global. (Delouche et al. 2007)

El cambio climático reducirá el rendimiento de los cultivos (Andréu y Gómez, 2007), es probable que el maíz, los frijoles, las patatas y el arroz se vean muy afectados; Su calidad también se verá afectada, posiblemente afectando la productividad del agricultor, incluso afectando negativamente la salud de su familia.

En la actualidad el retardo de las lluvias las sequías prolongadas la mala calidad de los suelos la reducción de número de especies y variedades en plantas, el aumento de temperatura, la mayor incidencia de plagas y enfermedades que van en aumento y la reducción de los sentimientos son algunas de las evidencias del cómo ha impactado el cambio climático a la agricultura. Por lo que en algunos estudios se ha hablado habrá menos pero más intensidad de lluvias, lo que producirá tanto sequías como inundaciones lo que causa más vientos y ciclones causando epidemias con brotes de enfermedades y plagas en los cultivos afectando su producción y acelerando la erosión de las tierras y del consumo de la materia orgánica en los suelos que es la fuente de nutrientes de las plantas. En resumen, el cambio climático modificará sustancialmente el acceso Al agua e incrementará lo que ya inherente incertidumbre de la agricultura y la vida rural ya que este es su sustento la agricultura es el

sustento del mundo y esta gran preocupación ver como el cambio climático afecta tanto causando grandes problemas de plagas y enfermedades en la agricultura.

El calentamiento global amenaza altamente a la video diversidad de algunas plantas como es la papa y por su causa podría desaparecer muchas de las 5000 variedades existentes. Aumentaría la presión sobre la especie silvestre de la papa. Se cree que un 16-22% de ellas estaría amenazada de extinción para el año 2055. Esta es una situación muy grave si tiene en cuenta que las especies silvestres son más importantes fuertes de genes para el mejoramiento de variedades existentes ya que es una oportunidad de mejorar nuestras variedades actuales (Alonso 2008). La elevación de la temperatura podría además provocar la aparición de nuevas plagas y una eventual destrucción del hábitat natural de los tubérculos o de hortalizas que normalmente estamos consumiendo hoy en día. Un modelo de simulación demostró que un clima más caluroso extendería el periodo agrícola e incrementaría su producción en los países del norte de Europa. Sin adaptación, Incremento de las temperaturas disminuiría la producción de papa o algunos otros cultivos entre el 10-19% de 2010 a 2039 y entre el 18-32% de 2040 a 2069, siendo la franja tropical la zona más sensible donde la merma podría ser mayor al 50% (Alonso 2008)

Los cultivos tropicales incluyen cultivos importantes para la seguridad alimentaria y los recursos energéticos de alternativos. Pero, aun así, hay pocos estudios sobre cómo el cambio climático impacta en las enfermedades de los cultivos. Se encuentran hallazgos de estudios previos sobre algunos efectos del cambio climático sobre las enfermedades de café, la caña de azúcar, el eucalipto, la yuca, los cítricos, el banano, la piña, el anacardo, el coco y papá y se han resumido para proporcionar un contexto (Ghini et al. 2011).

En la actualidad se encuentran disponibles métodos para evaluar el impacto del cambio climático en las enfermedades de cultivos tropicales y de plantaciones, presentan tendencias para algunas enfermedades y estrategias de manejo, identificando algunas lagunas críticas en el conocimiento y surgimiento de algunos enfoques experimentales y analíticos para avanzar en el

conocimiento de enfermedades en cultivos, proyectando las condiciones climáticas que podrían variar o la probabilidad de variación climática en el futuro de unos continentes a otros y de un país desarrollado a otro desarrollado, los estudio se debe realizar en regiones tropicales considerando sus condiciones ambientales específicas, estudios multifactoriales en situaciones de campo realista, como el enriquecimiento de CO₂ en el aire libre como concentraciones crecientes de CO₂ y O₃ la incorporación de medidas de infla tan CIA es espectral en sitios para una evaluación realista del crecimiento de las plantas es un camino a seguir. (Ghini et al. 2011)

Los efectos del cambio climático son potenciales enemigos en la agricultura, según el IPCC (Solomon, 2007), Causando rendimientos bajos en regiones más cálidas por estrés del calor, dañando los cultivos le erosión del suelo y las grandes precipitaciones inesperadas Y degradación de la tierra resultante del aumento de las sequías en algunas regiones si piensa hacer simulaciones de cultivos modelos, impulsadas por escenarios similares al clima de los esperados en el futuro. Se sugiere que ciertos modelos experimentales tomen lugar en regiones donde todavía hay escasez de producción de alimentos, ciertamente los aumentos de la frecuencia de clima extremo de climas extremos eventualmente resultan de mayor abiótica importancia bajo estrés del clima futuro.

Las enfermedades son responsables del al menos el 10% de pérdidas en producción mundial de alimentos lo cual amenaza la seguridad alimentaria de mundo, agrios 2005 estima una pérdida anual por enfermedades de 220,000 millones de dólares a lo cual se le deberá agregar el 6-12% de la pérdida después de cosecha. El cambio climático tiende a aumentar la incertidumbre en la producción de muchos cultivos en países tropicales, incluyendo muchos países desarrollados donde estos cultivos pueden formar parte de una base importante del Producto Interno Bruto. (Ghini et al. 2011)

Cualquier tipo de problema en la agricultura causó un impacto en la economía y la sociedad, con aplicaciones de gran alcance más allá de la simple producción perdida. Por lo tanto, existe limitada información disponible sobre el impacto del cambio climático en los cultivos tropicales y las proyecciones futuras se basan principalmente en los estudios de los experimentos modelos.

La recopilación de datos climáticos de aproximadamente 10 años en adelante, nos podría brindar una gran información respecto a los cambios que se podrían aproximar en el futuro. Por lo tanto, es necesario el conjunto de datos a largo plazo son particularmente raros relacionada con las enfermedades de los cultivos tropicales y de plantación son requisito previo para encontrar huellas dactilares de variación climática de las enfermedades de las plantas, que por esto podemos verificar los cambios similares que han habido en el pasado, como las enfermedades ha cambiado ah les ponerse a los distintos cambios si se han desarrollado más o incluso si se han reprimido o no logran desarrollarse de la misma manera (Velásquez et al. 2018).

En la actualidad muchas de las condiciones ambientales afectan a el desarrollo de las plantas las cuales podrían ser como cantidad de luz, agua disponible, temperatura, fertilidad del suelo, ozono atmosférico como concentración de metano y CO₂ y velocidad del viento (Velásquez et al. 2018).

Los gases provocarán un aumento de la temperatura global entre 1,5 C y 4,8 C a finales de siglo en relación con la temperatura antes de la era industrial año 1800. Un aumento de 0.85 C (Intervalo de incertidumbre del 90% entre 0,65 y 1,06 C) se ha observado hasta ahora, con condiciones climáticas extremas, como olas de calor, sequías, inundaciones y lluvias intensas, se prevé que aumenten en gravedad y / o duración (Velásquez et al. 2018).

Temperatura

En cada interacción de planta-patógeno existen temperaturas óptimas en los rangos de desarrollo de enfermedades por lo tanto cada patógeno necesita de temperaturas óptimas para su crecimiento y desarrollo. Se encontró que el patógeno *Puccinia striiformis* no podía causar infecciones en el laboratorio si se inoculan en plántulas de trigo a temperaturas constantes superiores a 21 C, mientras que, en el campo, la infección ocurrió incluso cuando las temperaturas fluctuaron entre 18 C y 30 C (Velásquez et al. 2018).

Los cambios de temperatura aumentan proyectando un cambio drástico que probablemente cambiará la distribución regional en un cultivo susceptible a un patógeno en particular para el área

exterior de los trópicos, una tendencia mundial es la mayor prevalencia de los patógenos inoculados. Otro resultado del calentamiento es la temperatura que podría causar el origen de nuevas cepas del mismo patógeno pudiendo asimismo efectuar y cambiar la temperatura óptima para su desarrollo e incubación. Se han obtenido poblaciones de diferentes geografías regiones donde la interacción entre el hongo de la roya *Puccinia striiformis* y el trigo han surgido nuevas razas que se ha catalogado más agresivas por las causas de las enfermedades a temperaturas más altas y han aparecido desde los años 2000 y se ha convertido en una amenaza en todo el mundo en sólo unos pocos años (Velásquez et al. 2018).

Disponibilidad de Agua

La mayoría de las enfermedades de las plantas se ven favorecidas por las condiciones de lluvia, alta humedad del aire y alta humedad del suelo. En particular, la virulencia de patógenos que infectan los tejidos aéreos se ve favorecido en gran medida por la lluvia y alta humedad. Por ejemplo, la virulencia del hongo *Sclerotinia sclerotiorum* aumenta a medida que aumenta la humedad del aire, con el mayor desarrollo de enfermedades en plantas de lechuga cuando la humedad relativa del aire supera el 80%. Contrariamente al efecto observado para la infección por *Ralstonia* del tomate, las condiciones de sequía causaron infecciones más agresivas por *Magnaporthe oryzae* en el arroz, lo que da como resultado un patógeno más grande poblaciones y síntomas de enfermedad más visibles, los ejemplos son excepciones, ya que hay pocas interacciones planta-patógeno en el que la baja humedad favorece el desarrollo de enfermedades (Velásquez et al. 2018).

Efecto combinado de múltiples factores ambientales

Predecir el efecto combinado de las condiciones ambientales cambiantes sobre la enfermedad no es sencillo, pero la combinación de factores ambientales causa el desarrollo de la planta una reducción severa. Para muchos patógenos fúngicos, la combinación de temperaturas cálidas y alta humedad proporcionan el óptimo condiciones para el desarrollo de la enfermedad

(André C. Velásquez, 2018). Cómo los efectos combinados de múltiples factores ambientales afectan el resultado de la enfermedad sigue siendo uno de las preguntas más destacadas y desafiantes para el estudio futuro de interacciones planta-patógeno (Velásquez et al. 2018).

Mecanismos moleculares subyacentes ambientales

Las plantas han desarrollado sofisticados mecanismos de defensa para defenderse fuera de los ataques de patógenos. Estos mecanismos incluyen los activados por PAMP inmunidad (PTI), inmunidad activada por efectores (ETI), ARN interferencia (ARNi) y regulación intrincada de la hormona de defensa vías (Velásquez et al. 2018). PAMP es un mecanismo en el que las moléculas conservadas de microbios (patrones moleculares asociados a patógenos son reconocidos por la membrana plasmática de la planta receptores de reconocimiento de patrones localizados (PRR) (Velásquez et al. 2018).

Dentro de los mecanismos moleculares que se presenta existen diferentes impactos ambientales que afectan o influyen de manera directa o indirecta dentro de los procesos de fitomejoramiento en los que sobre sale inmunidad desencadenada por efectores (ETI), esta es una forma ampliamente utilizada y una de las más eficaces de resistencia controlada contra patógenos vegetales es ETI. Este es un efecto de patógenos que promueve la virulencia o su actividad dentro las células vegetales que son detectadas por proteínas de resistencia vegetal. (Velásquez et al. 2018). Por otro lado, se encuentra el impacto en los rasgos de resistencia cuantitativa, esta es menos empleada a nivel molecular que el PTI o ETI, mismo que reduce, pero no elimina por completo los síntomas de la enfermedad. (Velásquez et al. 2018).

Otros de los efectos que influye en el impacto ambiental es el ARN de interferencia (ARNi) que es un mecanismo de defensa generalizado contra virus, la importancia de este se puede inferir por la plétora de los supresores de ARNi presentes en virus vegetales. Estos ARNip se utilizan para "silenciar" la producción de nuevas partículas virales dirigidas a los ARN del virus. (Velásquez et al. 2018). En otros casos existe un impacto en las vías de las hormonas de defensa entre ellas las hormonas del estrés,

en particular ABA, SA, ácido jasmónico (JA) y etileno (ET), son reguladores bien conocidos de abióticos o bióticas respuestas en plantas. En particular, ABA participa en la regulación múltiples tensiones ambientales abióticas, incluida la sequía, respuestas de calor, frío y salinidad, mientras que SA, JA y ET participan en la regulación de respuestas contra patógenos. Parte del impacto ambiental en el desarrollo de enfermedades de las plantas puede estar mediada por la regulación de las hormonas de defensa y la interferencia hormonal entre la señalización ABA (respuestas abióticas) y señalización SA / JA / ET respuestas bióticas (Velásquez et al. 2018).

Mecanismos de modulación ambiental de la virulencia de patógenos

Los patógenos han desarrollado muchos mecanismos para sobrevivir en las plantas, las defensas y otros procesos celulares con el fin de explotar las plantas ricas en fotosintato. Estos mecanismos de virulencia incluyen sistemas de secreción especializados para administrar una variedad de factores de virulencia en la célula vegetal, entre ellos, la esporulación en patógenos fúngicos y oomicetos, y asociación íntima de virus o algunos otros patógenos con sus insectos vectores (Velásquez et al. 2018).

Existen efectos que presentan una influencia en los mecanismos de virulencia de patógenos bacterianos, la interacción entre las condiciones ambientales y el patógeno, han presentado mejores estudios con respecto a las bacterias, un ejemplo de ello es *Agrobacterium tumefaciens* que es famoso por producir un crecimiento similar a un tumor en sus huéspedes, que es un sello distintivo de la enfermedad de la agalla de la corona. La patogénesis de *Agrobacterium* depende de la formación de un pilus extracelular (T-pilus) implicado en la translocación de promotores de virulencia ADN y proteínas, en una función que requiere la expresión de un gran número de genes de virulencia (Velásquez et al. 2018).

Estudios recientes sugieren que los mecanismos de virulencia bacteriana implican el establecimiento de un ambiente líquido que promueve enfermedades, en el apoplasto de hojas infectadas. Como tal, es posible que los efectos sobre la virulencia del patógeno de algunos efectos

pueden hacerse evidentes sólo bajo ciertas condiciones ambientales, condiciones que se presenta en la naturaleza, pero no en condiciones de laboratorio (Velásquez et al. 2018).

Es bien sabido que la producción y dispersión de inóculo son fundamental para las epidemias de enfermedades en los campos de cultivo. En ciertas ocasiones, el viento puede dispersar las esporas de hongos a lo largo de miles de kilómetros, como se ha observado para el patógeno de la roya del tallo del trigo *Puccinia graminis* como parte fundamental de su ciclo de enfermedad. Se cumple este requisito de alta humedad para la esporulación. para la mayoría de patógenos fúngicos y oomicetos (Velásquez et al. 2018).

Enfoques experimentales

Es un enfoque que ayuda a comprender y predecir cómo afecta el impacto del cambio climático en los cultivos enfocados a experimentar y manipular la temperatura, precipitación, CO₂, O₃ y horas luz. Un enfoque multifactorial imita la forma en que el cambio climático altera los agroecosistemas, lo que permite una evolución de impacto más realista. Sin embargo, los estudios multifactoriales del cambio climático nunca se han hecho con tropicales y enfermedades de los cultivos de plantaciones normalmente sea trabajado para enfermedades de cultivos anuales (Ghini et al. 2011). Algunos aún discuten el diseño y la funcionalidad de los experimentos multifactoriales con un enfoque particular en las interacciones y artefactos relacionados con los tratamientos combinados.

Experimentar con un CO₂ elevado, calentamiento y sequías, pueden afectar en la temperatura objetivo de un diseño experimental de cambio climático multifactorial (Ghini et al. 2011). El estudio experimental de los efectos a largo plazo del aumento de CO₂ y concentraciones de O₃ en cultivos tropicales y de plantación en entornos de campo más realistas aún no se han hecho en escala integral. La regla general de la alta concentración de CO₂ atmosférico resulta en mayor rendimiento y el desarrollo vegetal no siempre es aplicable a estos cultivos (Ghini et al. 2011).

A pesar de la evidencia general de los efectos beneficiosos del CO₂ en planta huésped, no se sabe bien si estos efectos seguirán al tener lugar en presencia de patógenos u otros factores limitados,

particularmente en los países tropicales. Estudios bajo las condiciones controladas pueden que no reflejen las respuestas de las plantas en el campo, donde se podrían encontrar variaciones e interacciones entre temperatura, precipitación y otras variables del clima. Las cámaras FACE y open-top (OTC) ofrecen opciones más realistas para comprender como el aumento de composición atmosférica de CO₂ y O₃ pueden influir en la interacción hospedero patógeno, gravedad de enfermedades y manejo de cultivos (Ghini et al. 2011).

Sin embargo, entre Free Air CO₂ Enrichment system (FACE) y Open Top Chamber (OTC) estudios descritos por ellos, ninguno fue con tropical o cultivo de plantación. Los OTC diseñados para clima templado no son adecuados a las regiones tropicales, porque alteran el microclima de otro de un OTC. La temperatura alcanzada dentro del OTC, en situaciones tropicales es mucho más alto que las condiciones ambientales en situaciones templadas, provocando cambios significativos en el microambiente. La intensidad de la luz está particularmente disminuida, la velocidad del viento es menor y la humedad relativa es mayor (Lessin y Ghini 2009).

Un ejemplo incluye parcelas de cafetales experimentales de un tamaño de 7ha. El climapest FACE tiene como objetivo estudiar Los efectos individuales y combinados de una alta concentración de CO₂, suministro de agua y nitrógeno. Evalúen el impacto del aumento de concentración de CO₂ en las enfermedades de las plantas, plagas y malezas en especies forestales, manzana, melón, soya, uva, maíz, algodón, cultivo cerrajeros, café, mandioca y banano, el proyecto Climapest está instalado en seis mini-instalaciones de FACE el país de Brasil .

Los beneficios y limitaciones de los diferentes métodos de estudio de los efectos del cambio climático en los cultivos. Cada método experimental tiene un control de las condiciones ambientales con ventajas y desventajas (Pritchard y Amthor 2005). En condiciones controladas, controla la temperatura superior, humedad, concentraciones de gases y pueden alcanzar otras variables. Sin embargo, los estudios realizados en condiciones controladas pueden no reflejar la respuesta de las

plantas en campo, donde hay variaciones de interacciones entre temperatura, precipitación y otros factores que no se podrían encontrar en los experimentos (Ghini et al. 2011).

En resumen, existe información limitada sobre el impacto climático en enfermedades de las plantaciones tropicales y cultivos como resultado de la fase lista de estudios experimentales. Los efectos potenciales del cambio climático dependen de la combinación de huésped y un patógeno, y beneficio asociado a microorganismos. Además, el impacto no se puede generalizar sin más estudios detallados. En general la discusión anterior se basa en escenarios futuros proyectados utilizados en conocimiento disponible en la literatura para huéspedes, patógenos y enfermedades. Por lo tanto, existen una incertidumbre asociada con la amplitud de hospedero si patógenos. En algunas ocasiones el impacto en las estrategias de manejo de enfermedades, las estrategias están influenciadas por el clima y las condiciones de este (Ghini et al. 2011). Debido a la limitada información sobre el impacto del clima en cultivos tropicales y plantaciones enfermedades, plantas y malezas es difícil predecir los efectos sobre el manejo integrado de plagas.

Conclusión

Se determinó que las condiciones climáticas están relacionadas con la presencia de nuevos patógenos en distintas regiones que son las causantes de enfermedades epidémicas en los cultivos agrícolas de importancia. Según la literatura citada las plagas que afectan a los cultivos también son afectadas por los periodos de sequía más prolongadas causando así el aumento de la población de plagas que son vectores de enfermedades. Como enfermedades que provocan los fitopatógenos *Mycosphaerella fijiensis* y *Hemileia vastatrix* donde se vio una gran dispersión por medio de algunas tormentas tropicales y huracanes, en la epidemiología se da a conocer que estos ejemplos necesitan de cierto tipo ambiente para desarrollarse y podrían ser afectados por condiciones de baja temperatura, porcentaje de humedad en el ambiente, sequias, y entre otros. Algunos estudios han revelado que plantas resistentes a patógenos como *H. vastatrix* han perdido su resistencia debido a mutaciones y condiciones climáticas que afectan al patógeno, haciendo que sea más difícil su control. Por otra parte, también existen condiciones que la favorecen como lo son las intensas lluvias, alta humedad en el ambiente, temperaturas altas y otras. Por lo tanto, se han desarrollado estudios sobre el cambio climático utilizando estaciones experimentales que miden condiciones como, con alta presencia de CO₂, O₃, radiación solar, horas luz, sequias y entre otros fenómenos, de esta manera se observó la reacción de patógenos y plantas.

Recomendaciones

Se recomienda tomar en cuenta enfermedades de regiones cercanas a Centroamérica en caso de que suceda algún fenómeno climático que facilite su dispersión y realizar muestreos inmediatos en la zona.

Establecer alianzas estratégicas entre estaciones experimentales para obtener un mejor manejo de los patógenos e implementar diferentes investigaciones sobre las enfermedades y su desarrollo debido a que estarán expuestas y podrían surgir nuevas variedades.

Implementar prácticas de manejo del control de plagas y enfermedades bajo condiciones de cambio climático que afectan el ciclo de vida y control de plantas hospederas de plagas y patógenos

Referencias

- Achicanoy López H. 2000. Descripción cuantitativas de las epidemias de las plantas. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. 53(1):941–968.
- Alexander LV, Allen SK, Bindonff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, et al., editores. 2013. Cambio Climático 2013 Bases físicas. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (EE.UU): Cambridge University Press ; [consultado el 3 de ago. de 2021]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
- Alfaro Martínez EJ. 2005. Variación de la frecuencia de los ciclones tropicales en el Atlántico y Pacífico tropical del este debido a variaciones decadales e interanuales de la temperatura superficial del mar. En: *Memorias del "XI Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y XIV Congreso Mexicano de Meteorología"* Cancún, México. Del 27 de febrero al 5 de marzo del 2005. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. p. 1–11.
- Alonso JL. 2008. La papa y el calentamiento Global. Argentina: Bitacora de la papa; [actualizado el 9 de dic. de 2008; consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3xoNMom>
- Alvarez E, Pantoja A, Gañán L, Ceballos G. c2021. La Sigatoka negra en plátano y banano. Roma: FAO; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <http://www.fao.org/3/as089s/as089s.pdf>
- Avelino J, Rivas G. 2014. La roya anaranjada del cafeto. Francia: Hal archives-ouvertes; [actualizado el 1 de feb. de 2021; consultado el 3 de ago. de 2021]. español. <https://bit.ly/3rXoqD>
- Ballester F, Díaz J, Moreno JM. 2006. Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. *Gac Sanit*. 20 (Suppl 1):160–174. spa. doi:10.1157/13086040.
- Bardales WA. 2017. Variabilidad y cambio climático en Guatemala: Instituto Nacional. Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales ; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/13247.pdf>

- Bardales Espinosa WA, Castañon C, Herrera Herrera LJ. 2019. Clima de Guatemala tendencias observadas e índices de cambio climático. Guatemala: Universidad del valle de Guatemala ; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3jp8q2M>
- Benavides Lopez LF. Cuantificación temprana de *Pseudocercospora fijiensis* por medio de PCR en modelos Prevenetivos de la Sigatoka negra en la plnata de banano(Musa AAA) [Tesis]. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. español.
- Bertrand B, Rapidel B. 1999. Desafíos de la caficultura en Centroamérica. San José (Costa Rica): Centro de Cooperación Internacional de Investigación Agrícola para el Desarrollo (CIRAD); IRD; CCCR; IICA. 496 p. ISBN: 92-9039-391-2.
- Blunden J, Arndt DS. 2015. State of the Climate in 2014. Nueva Zelanda: Bull. Amer. Meteor. (vol. 96).
- Brown JKM, Hovmøller MS. 2002. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*. 297(5581):537–541. eng. doi:10.1126/science.1072678.
- Canet Brenes G, Soto Viquez C, Ocampo Thomason P, Rivera Ramírez J, Navarro Hurtado A, Guatemala Morales GM, Villanueva Rodríguez S. 2016. La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. México: CIATEJ. ISBN: 978-92-9248-651-8.
- Cárdenas López J. 2005. Roya del cafeto (*Hemileia vastratrix*). San Jose (Costa Rica): Croplife; [actualizado el 5 de feb. de 2007; consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3rRuFSG>.
- [CENAOS] Centro de Estudios Atmosféricos, Oceanográficos y Sísmicos. 2016. El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Honduras: CENAOS; [actualizado el 1 de feb. de 2021; consultado el 4 de ago. de 2021]. <http://cenaos.copeco.gob.hn/elnino.html>
- Corredor-Moreno P, Saunders DGO. 2020. Expecting the unexpected: factors influencing the emergence of fungal and oomycete plant pathogens. *New Phytol*; [consultado el 3 de ago. de 2021]. 225(1):118–125. eng. doi:10.1111/nph.16007.

- Del Fajardo Castillo T. 2018. El acuerdo de París sobre el cambio climático: sus aportaciones al desarrollo progresivo del Derecho internacional y las consecuencias de la retirada de los Estados Unidos. *REDI*. 70(1):23–51. doi:10.17103/redi.70.1.2018.1.01.
- Delouche J, Burgos N, Gealy D, Zorrilla G, Ricardo L. 2007. Weedy rices: Origin, biology, ecology and control. Rome: FAO. 144 p. (FAO plant production and protection paper; vol. 188). ISBN: 978-92-5-105676-9.
- Duro Tamasiunas JM, Monzón Miranda R, González GR, Argueta Medina JC, Patricio García G, González OR, Vásquez R, Herrera L, Valladares R. 2002. Estimación de Amenazas Inducidas por Fenómenos Hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Guatemala: MAGA, CONRED, INSIVUMEN. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0069/doc0069.pdf>
- Dyer LA, Richards LA, Short SA, Dodson CD. 2013. Effects of CO₂ and temperature on tritrophic interactions. *PLoS One*. 8(4):e62528. eng. doi:10.1371/journal.pone.0062528.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. c2021. Disponibilidad de alimentos básicos. Roma: FAO; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <http://www.fao.org/3/Y2784S/Y2784S04.htm>
- Gallagher NA, Eagle M, Sarkar N, Cassiani S, Lori J. 2019. Pan American Health Organization/World Health Organization Collaborating Centers in Nursing and Midwifery in Haiti. *Rev Panam Salud Publica*. 43:e30. eng. doi:10.26633/RPSP.2019.30.
- Gerard PJ, Barringer JRF, Charles JG, Fowler SV, Kean JM, Phillips CB, Tait AB, Walker GP. 2013. Potential effects of climate change on biological control systems: case studies from New Zealand. *BioControl*. 58(2):149–162. doi:10.1007/s10526-012-9480-0.
- Ghini R, Bettiol W, Hamada E. 2011. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*. 60(1):122–132. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x.

- Gobierno de México. c2021a. Cómo se miden los huracanes. México: Gobierno de México; [consultado el 4 de ago. de 2021]. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-se-miden-los-huracanes>
- Gobierno de México. c2021b. Etapas de Evolución. México: Gobierno de México; [consultado el 4 de ago. de 2021]. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion>
- Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD. 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*. 296(5576):2158–2162. eng. doi:10.1126/science.1063699.
- Helms JB, Rothman JE. 1992. Inhibition by brefeldin A of a Golgi membrane enzyme that catalyses exchange of guanine nucleotide bound to ARF. *Nature*. 360(6402):352–354. eng. doi:10.1038/360352a0.
- Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Harvell CD, Sale PF, Edwards AJ, Caldeira K, et al. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*. 318(5857):1737–1742. eng. doi:10.1126/science.1152509.
- [IPS] Inter Press Service. 30 de may. de 1999. Clima: Récord de temperatura, tormentas e inundaciones en 1998. IPS Agencia de Noticias. <https://bit.ly/3xnm00j>
- Jiménez Díaz RM. 2008. Impactos potenciales del cambio climático sobre las enfermedades de los cultivos.: 30^º Jornadas de Productos Fitosanitarios. Valencia, (España): Phytohemeroteca; [actualizado el 1 de nov. de 2008; consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3yoUgVr>
- La Cuadra F de. 2013. Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas. Una vinculación necesaria Julio Postigo (editor). *Polis*. 12(36):525–532. doi:10.4067/S0718-65682013000300023.
- Lessin RC, Ghini R. 2009. Efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. *Trop. plant pathol*. 34(6):385–392. doi:10.1590/S1982-56762009000600004.
- Leyva P. 1998. El medio ambiente en Colombia. Santa Fe de Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. 495 p. ISBN: 958-95850-9-4.

- Ministerio de medio ambiente. c2020a. Archivo de Informes Especiales. El Salvador: Gobierno de El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/informes+especiales/archivo/>
- Ministerio de medio ambiente. c2020b. Cómo afectan los huracanes en Centroamérica y El Salvador. El Salvador: Gobierno de El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/ver/seccion+educativa/meteorologia/huracanes/como+afectan/>.
- Ministerio de medio ambiente de el Salvador. c2020. Categoría de los Huracanes. El Salvador: Gobierno de El Salvador; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://www.snet.gob.sv/ver/seccion+educativa/meteorologia/huracanes/categorias/>
- Mora Aguilera G, Acevedo Sanches G, Flores Sanches J, Dominguez Monge S, Baker P, Gonzalez Gomez R. 2014. Consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la fitosanidad de cultivos tropicales. *Revista Mexicana de fitopatología*; [consultado el 3 de ago. de 2021]. 32(2):147–167. <https://www.redalyc.org/pdf/612/61243856006.pdf>
- Mora Aguilera G, Valencia Morales H. 2016. *Roya del cafeto Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. México: SENASICA. ISBN: 978-607-715-150-0.
- Murillo Salas JE. 2015. Efecto de la sensibilidad de *Mycosphaerella fijiensis* sobre la eficacia biológica de fungicidas sistémicos utilizados contra la sigatoka negra. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica Sede Regional San Carlos. eng.
- Nelson G, Rosegrant M, Koo J, Robertson R, Sulser T, Zhu T, Ringler C, Msangi S, Palazzo A, Batka M, et al. 2009. *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- Nelson GC. 2009. *Cambio climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Washington, D.C.: Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, IFPRI. 19 p. ISBN: 0-89629-537-0.
- Nicholls CI. 2008. *Control biológico de insectos: Un enfoque agroecológico*. Medellín: Universidad de Antioquia. 278 p. (Colección Ciencia y Tecnología). ISBN: 978-958-714-186-3.

- Nicholls RJ, Klein RJ. 2005. Climate change and coastal management on Europe's coast. En: Vermaat J, Salomons W, Bouwer L, Turner K, editores. *Managing European Coasts*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. p. 199–226 (Environmental Science).
- Niggol Seo S, Mendelsohn R. 2008. A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on South American Farms. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 68:69–79. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/chiljar/v68n1/at07.pdf>
- [ONI] Based on Oceanic Niño Index. 2021. El Niño and La Niña Years and Intensities. California: Golden gate weather service; [actualizado el 1 de ene. de 2021; consultado el 2 de ago. de 2021]. <https://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Ordaz JL, Mora J, Acosta A, Serna B, Ramírez D. 2010. Honduras: efectos del cambio climático sobre la agricultura. México: CEPAL; [consultado el 4 de ago. de 2021]. <http://hdl.handle.net/11362/25916>
- Orgaz CJ. 2019. ¿Qué es el Corredor Seco y por qué está ligado a la pobreza extrema en casi toda Centroamérica? Reino Unido: BBC News Mundo; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-48186820>
- Plucknett DL. 1992. Los bancos genéticos y la alimentación mundial. San Jose: IICA. 257 p. (IICA. Investigación y Desarrollo; vol. 021). ISBN: 92-9039-200-2.
- Pritchard SG, Amthor JS. 2005. Crops and environmental change: An introduction to effects of global warming, increasing atmospheric CO₂ and O₃ concentrations, and soil salinization on crop physiology and yield. New York: Food Products Press. xii, 421 s. (Crop science). ISBN: 1560229128.
- Quiroga IA. 2015. Impactos del cambio climático en la incidencia de plagas y enfermedades de los cultivos. Colombia: Universidad Nacional de Colombia; [consultado el 3 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3fsedmU>
- Rodríguez E, Suazo L. 2017. Introducción al cambio climático. 1ra. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. ISBN: 978-99926-790-8-1.

- Roiloa SR, G. Campoy JG, Retuerto R. 2014. Understanding the role of clonal integration in biological invasions. *ECOS*. 24(1):76–83. doi:10.7818/ECOS.2015.24-1.12.
- Ruddiman WF. 2003. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change*. 61(3):261–293. doi:10.1023/B:CLIM.00000004577.17928.fa.
- [SEAE] Sociedad Española de Agricultura Ecológica. 2004. Actas VI Congreso SEAE de Agricultura y Alimentación Ecológica: II Congreso Iberoamericano de Agroecología, I Encuentro de estudiantes de agroecología y agricultura ecológica: [del 27 de septiembre al 2 de octubre de 2004]. España: Sociedad Española de Agricultura Ecológica. 1 disc òptic (CD-ROM);. ISBN: 8460922979.
- Secretaría de la CIPF. 2021. Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas. Roma: FAO en nombre de la Secretaría de la CIPF. ISBN: 978-92-5-134507-8.
- Smith ME, Phillips JV, Spahr NE. 2002. Huracan Mitch, caudal de creciente en tramos de rios seleccionados en Honduras. Honduras: USGS.
- Tejada Martínez A, Gómez Azpeitia G. 2015. Prontuario solar de México. México: Universidad de Colima. ISBN: 978-607-8356-45-4; [consultado el 4 de ago. de 2021]. <https://bit.ly/3luDbps>
- Thomson LJ, Macfadyen S, Hoffmann AA. 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*. 52(3):296–306. doi:10.1016/j.biocontrol.2009.01.022.
- Torres Puente VM. 2019. Weather, climate and the atmospheric phenomena: From whirlwinds to climate change. *RDU*. 20(1):1–13. doi:10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3.
- Uribe Botero E. 2015. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Santiago (Chile): CEPAL; [consultado el 13 de abr. de 2021]. <https://bit.ly/3lxxWp8>
- van der Plank J. 2014. Principles of Plant Infection. Saint Louis: Elsevier Science. 231 p. ISBN: 9780323159678.
- Velásquez AC, Castroverde CDM, He SY. 2018. Plant-Pathogen Warfare under Changing Climate Conditions. *Curr Biol*. 28(10):R619-R634. eng. doi:10.1016/j.cub.2018.03.054.

Virginio Filho EM, Astorga Domian C. 2015. Prevención y control de la roya del café Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. 1ra. Turrialba, (Costa Rica): CATIE. ISBN: 978-9977-57-655-

8.