

## Cálculo de grados días de *Hypothenemus hampei* a través de imágenes satelitales

Luis Alberto Olvera-Vargas<sup>1§</sup>  
David Israel Contreras-Medina<sup>1</sup>  
Noé Aguilar-Rivera<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Cátedra CONACYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, AC. Normalistas 800, Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México. CP. 44270. Tel. 33 31093057. (dcontreras@ciatej.mx). <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Universidad Veracruzana. Camino Peñuelas-Amatlán km 177, Córdoba, Veracruz, México. CP. 94500. Tel. 271 7166129. (naguilar@uv.mx).

§Autor para correspondencia: lolvera@ciatej.mx.

### Resumen

El café es uno de los cultivos más relevantes en México, su importancia radica en que es un cultivo sustentable, ha sido adoptado y adaptado por comunidades indígenas y genera divisas para el país. Una de las regiones caficultoras más importantes del país, es la del Pacífico Sur, compuesta por Chiapas, Oaxaca y Guerrero donde se produce 53% del café y se encuentra 60% de los productores de este aromático. La presencia de las plagas y enfermedades en el café puede generar pérdidas entre 30 al 50% de la producción. La broca de café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) es el problema entomológico más grave de este cultivo y su presencia en el país es de hace más de 40 años, actualmente se encuentra en todos los estados que cultivan café. Es por ello, que en este trabajo se generó una metodología práctica que calculó espacialmente los grados días de desarrollo de la broca de café a través de la temperatura de la superficie registrada por imágenes Modis con una resolución espacial de 1 km y con una resolución temporal de un día, monitoreando del 01 de abril de 2018 al 31 de marzo de 2019. Los resultados indicaron que en esta región se puede formar hasta 13 generaciones de la plaga, presentando riesgo en casi todo el año, tanto por el desarrollo como en la dispersión de la plaga. Esta metodología puede apoyar a fortalecer el monitoreo que se hace de la plaga en el país.

**Palabras clave:** broca de café, grados días de desarrollo, monitoreo, riesgo, unidades calor.

Recibido: febrero de 2020

Aceptado: mayo de 2020

## Introducción

El café es uno de los cultivos más relevantes en México, su producción asciende a más de 800 mil toneladas al año y se cultiva en 483 municipios de 14 estados del país con una extensión de 712 mil hectáreas, que representa 3.3% de la superficie agrícola del país (SIAP, 2018). Se exporta 18% de la producción a 35 países, contribuyendo con 1.6% del total mundial producido, generando más de 900 millones de pesos en divisas para el país (SIAVI, 2018).

El cultivo ha sido adoptado y adaptado, en su mayoría, por comunidades indígenas (>60%) con sistemas agroforestales nativos (Barrera *et al.*, 2004), los cuales han sido desplazados como consecuencia de la diversificación de los sistemas de producción asociadas a las presiones del mercado mundial y junto a problemas de cambio climático y presencia de plagas y enfermedades, la caficultura sufre una degradación desde todas sus perspectivas, notándose en la producción obtenida (reducción de -3.9% anualmente en los últimos 20 años) y su competencia internacional (Haggar *et al.*, 2013; Covalada *et al.*, 2014; Higuera y Rivera, 2018).

Las plagas y enfermedades son una de las amenazas más importantes para el cultivo, y se encuentran entre los factores limitantes más importantes de la productividad de los sistemas agroforestales, ya que pueden ser responsables de la pérdida entre 30 al 50% de la producción (Oerke, 2006; Barrera, 2007). El café es susceptible a más de 287 patógenos (CABI, 2018) donde las más dañinas son la roya (*Hemileia Vastatrix*) y la broca de café (*Hypothenemus hampei*) (Giraldo-Jaramillo *et al.*, 2018; Libert y Paz, 2018).

La broca de café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) es el principal problema entomológico del café, ya que genera baja rentabilidad en el cultivo, disminuye la cantidad en la producción, eleva los costos de producción y altera la inocuidad de la bebida por la presencia de ochratoxinas (Camilo *et al.*, 2003; Romero *et al.*, 2007). En México, la broca de café fue detectada por primera vez en 1978, en el ejido Mixcum, municipio de Cacahoatán, en la región de Soconusco Chiapas, se mantuvo en ese sitio hasta que en 1989.

Se reportó en San Miguel del Puerto, Pochutla, Oaxaca; en 1991 en Tezonapa, Veracruz y en 1993 llegó hasta Atoyac de Álvarez, Guerrero. Para 1994 estaba presente en 97 municipios de 5 estados: Veracruz, Puebla, Chiapas, Oaxaca y Guerrero. En 1998, llegó a San Luis Potosí que es el límite boreal de las zonas cafetaleras del país (Barrera, 2005; Ramírez *et al.*, 2007). Actualmente, la broca de café se encuentra en todas las zonas productoras de café en México, aunque los niveles de infestación, determinadas por las condiciones agroecológicas y el manejo agronómico, van de 0 al 8.2% (SENASICA, 2018).

Desde la primera detección, en el país se han llevado acciones para detectar y controlar a la Broca de café, primero la implementación del manejo integrado de la broca (MIB) a través del control legal, cultural y biológico, posteriormente la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-002-Fito-1995 que estableció de carácter obligatorio la confinación y erradicación de focos de infestación y actualmente la norma NOM-002-FITO-2000 que establece todas las medidas antes mencionadas, controlando las infestaciones por debajo del umbral económico (< 3% de infestación) (DOF, 2001; SENASICA, 2016).

Ante la importancia social y económica del café y los daños ambientales y económicos provocados por la propagación de *Hypothenemus hampei*, se han hecho esfuerzos en el país para combatir esta y otras plagas del cafeto. Ejemplo de ello es la creación del programa de vigilancia epidemiológico fitosanitario del cafeto (<http://www.royacafe.lanref.org.mx/>) y el sistema integral de referencia para la vigilancia epidemiológica fitosanitaria (<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/Default.aspx#divVEF>) ambas de la dirección general de sanidad vegetal de SENASICA, donde se emplean herramientas tecnológicas como el Smartphone para la captura de datos, una plataforma web para el análisis multiescalar y la instalación de sensores climáticos para el seguimiento y a través de algoritmos que permitan conocer el comportamiento espacio-temporal, se generan modelos para el monitoreo y los muestreos, implementadas en las áreas regionales de control (ARCO) (CNRF-VEFCC, 2018).

Sin embargo, dentro de las estrategias de monitoreo de la Broca de café, ha faltado incorporar herramientas de teledetección. Chemura y Mutanga (2017); Decoro *et al.* (2017), mencionan que, debido a la complejidad y heterogeneidad agrícola del cultivo, las imágenes de satélite son insumos útiles para analizar espacialmente problemas de producción y fitosanitarios del café.

Chemura y Mutanga (2017); Cordero y Sader (2007) usaron imágenes Landsat 8 OLI y ETM+ respectivamente el primero para clasificar al cultivo de café por edades y relacionarlos con la producción y el segundo para diferenciar al café de otros cultivos; a través, de índices normalizados, ambos usando las bandas infrarrojas y la resolución radiométrica para clasificar y separar al café de la vegetación de sombra.

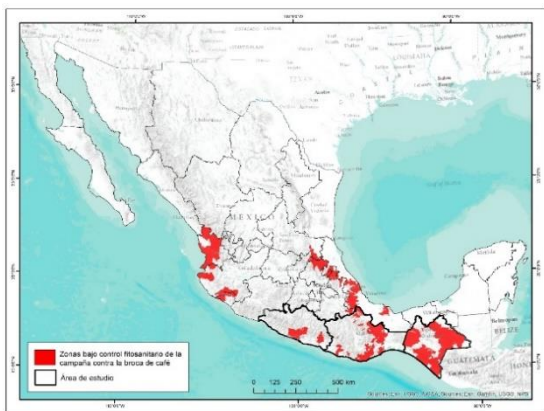
Por otro lado, Bernardes *et al.* (2012); Brunsell *et al.* (2009) usaron imágenes de satélite Modis para calcular el rendimiento del café por medio de índices de vegetación y a pesar de tener baja resolución espacial, la alta temporalidad de estas imágenes fortaleció el análisis fenológico del cultivo. Hassan *et al.* (2007); Zhang *et al.* (2013) usaron imágenes Modis para el cálculo de grados días de desarrollo con altos niveles de precisión y Decoro *et al.* (2017) usaron imágenes de alta resolución para el cálculo de unidades calor que ayudaron a la identificación de áreas de riesgo a nematodos en el café.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología práctica que calcule espacialmente los grados días de desarrollo de *Hypothenemus hampei* a través de la temperatura de la superficie registrada por imágenes Modis en cultivos de café de los estados del Pacífico Sur. Esta metodología se presenta como una opción para el monitoreo de la Broca de café a escala regional, que además se caracteriza por no ser invasivas, es automatizable, con resultados inmediatos, con una dinámica espacio-temporal alta, que pueda ser utilizado para el monitoreo y vigilancia de la plaga.

## Materiales y métodos

La región cafetalera del Pacífico Sur es una de las más productoras del país, donde Chiapas, Oaxaca y Guerrero producen 53.9% del café en México, con un rendimiento de 0.92 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2018). En esta zona se concentra 60.5% de los productores de café del país (AMECAFE, 2006), los cuales en su mayoría son indígenas de diferentes etnias (Higuera y Rivera, 2018). En la región se observa cultivos de café en las modalidades sombra y bajo sol, con cinco diferentes sistemas, predominando el monocultivo bajo sombra, y que van desde los 600 hasta los 1 600 msnm (Barrera *et al.*, 2004).

Actualmente, la Broca de café se reporta en 244 municipios de 11 estados, generando daños económicos equivalentes a los 100 millones de pesos (SENASICA, 2019a) (Figura 1). Actualmente, la broca de café se encuentra en 44 municipios de Chiapas con niveles de infestación que van de 2.2 a 2.6%, Oaxaca reporta infestaciones entre 3.9 a los 4.7% en 55 municipios y Guerrero reporta infestaciones de 1.3% en 5 municipios (SENASICA, 2018).



**Figura 1. Situación actual de la Broca de café *Hypothenemus hampei* en México.** SENASICA (2019a).

Los grados días de desarrollo (GDD) es un índice que calcula el desarrollo biológico con base a la temperatura, y se ha aplicado en el monitoreo de cultivos o insectos (Hassan *et al.*, 2007). También conocido como unidades calor o unidades de desarrollo, los GDD en insectos se ha usado para calcular la velocidad de desarrollo basado en los rangos de temperatura umbral inferior y superior en la cual cesa el desarrollo de la especie y su requerimiento de acumulación de unidades calor para poder completar su ciclo de vida (huevo-adulto) (Maiorano, 2012; Damos, 2015).

Para la generación del modelo de grados días se descargaron imágenes Modis de la plataforma LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/Mod11A1--6>), específicamente el producto MOD11A1 versión 6 que proporciona diariamente la temperatura de la superficie terrestre (LST) por sus siglas en inglés con una resolución espacial de 1 km por 1 km. Se descargaron 356 imágenes correspondiente a una diaria con fecha entre el 01 de abril de 2018 al 31 de marzo de 2019 y para el cubrimiento total de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, se usaron dos cuadrículas (H9V7 y H8V7).

El procesamiento de las imágenes se realizó en el software ArcGIS v10.7, agregando el subdataset 0 de cada imagen, la cual corresponde a las LST diarias. Posteriormente, se realizó el escalamiento de los valores del pixel que originalmente están en un rango de 7 500 a 65 535, este procedimiento se realizó usando la calculadora raster, multiplicando a la imagen por el factor de escala que es de 0.02, dando como resultado el valor del pixel en unidad kelvin, la cual fue convertida a centígrados (Wan *et al.*, 2015). A cada imagen se le aplicó la siguiente fórmula: 
$$GDD = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} - UI$$

Donde:  $T_{min}$  = es temperatura mínima;  $T_{max}$  = es temperatura máxima y  $UI$  = es el umbral inferior de temperatura (Snyder, 1985; Hassan *et al.*, 2007). Para *Hypothenemus hampei* se usaron los datos obtenidos por Jaramillo *et al.* (2009); Giraldo-Jaramillo *et al.* (2018) quienes reportan una temperatura mínima y un umbral inferior de 13.9 °C y una máxima de 32 °C, con un acumulado de grados días de 299 unidades calor para completar las fases de huevo a adulto.

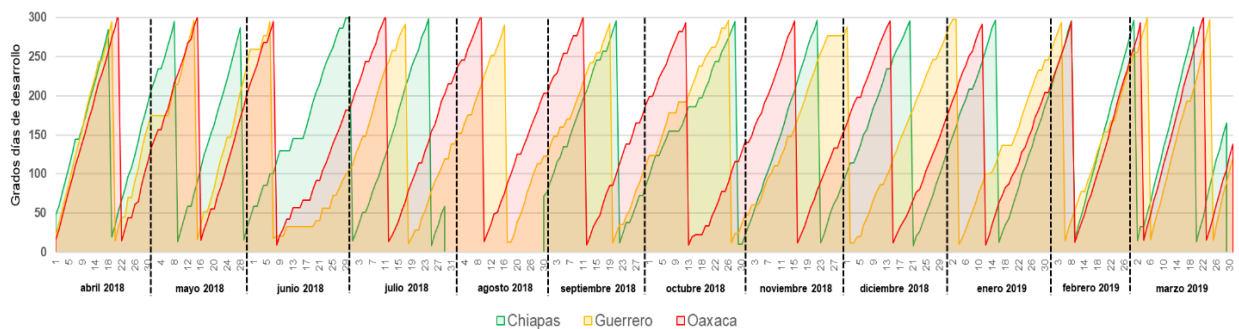
Para la representación cartográfica, se realizó una sumatoria de los valores por día para cada mes, además se realizó una transformación de sistemas de coordenadas de la proyección sinusoidal a la proyección cónica conforme a Lambert y aplicó una máscara para extraer sólo los valores de pixel de la zona de estudio.

Para establecer relaciones entre los modelos de grados días y la presencia e infestación de la plaga en la zona de estudio, se extrajeron de los boletines epidemiológicos de fitosanidad del cafeto (SENASICA, 2019b) datos de la incidencia nacional de adultos de broca capturados y los promedios de frutos brocados y adultos capturados por sitio/estado. Los boletines usados fueron los correspondientes a los meses de abril de 2018 (boletín núm. 56) hasta el de marzo de 2019 (boletín núm. 67).

Los datos extraídos fueron ingresados a una base de datos y separados por estado, además de relacionarlos con los municipios donde se reporta la plaga, para que a su vez fueran sobrepuestos a los resultados de grados días de desarrollo obtenidos del análisis de las imágenes.

## Resultados y discusión

Derivado del análisis de las imágenes de satélite, en la región del Pacífico Sur existen condiciones óptimas de temperatura para la acumulación de grados días de desarrollo de la broca de café. El cálculo muestra que el escenario es propicio para que se desarrollen más de 10 generaciones de *H. hampei* en un año (Figura 2) y este escenario se presentaría sólo si las condiciones de temperatura fueran constantes durante todo el año.



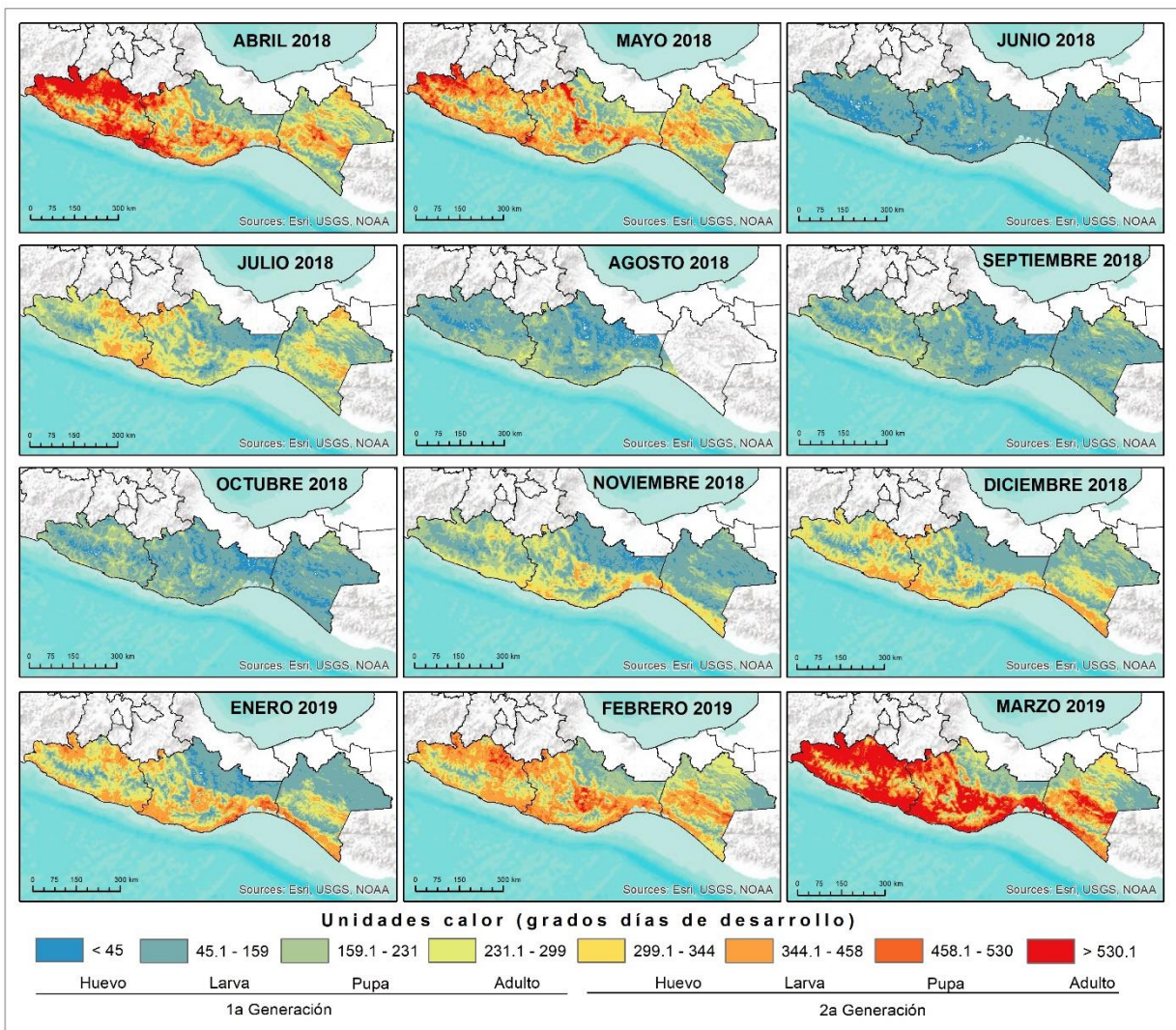
**Figura 2. Cálculo de grados días de *Hypothenemus hampei* en Chiapas, Guerrero y Oaxaca, según día, mes y año.**

Giraldo-Jaramillo *et al.* (2018) mencionan que la mayor reproducción e incidencia ocurre cuando hay aumento de temperatura y existe disponibilidad de fruta de café para la infestación, produciendo al año desde 5.1 hasta 12.4 generaciones. En México, se ha estimado que con temperaturas promedio de 20 a 22 °C el tiempo generacional es de 45 días (máximo 8 generaciones al año), bajo condiciones de campo (Ruiz *et al.*, 2013). Sin embargo, la acumulación de los grados días para completar una generación de la plaga es más intensa entre los meses de febrero a mayo, con desfases entre cada uno de los estados cafetaleros, reduciéndose la acumulación de unidades calor entre agosto a diciembre (Figura 2).



Cabe resaltar, que el café en México se produce entre los meses de octubre (inicio de cosecha) a mayo (termino de cosecha) en la zona de Guerrero, Oaxaca y Chiapas (SIAP, 2019). La fenología del cultivo varía según la temperatura definida por la estación del año, la altitud y la latitud, mientras que en los meses de febrero y marzo predomina la floración, de agosto a diciembre el cultivo está en etapa consistente y en maduración, siendo estas etapas las de más alto riesgo por afectaciones de *H. hampei* (SENASICA, 2019b).

El comportamiento espacial de los grados días de desarrollo se pueden observar en la Figura 3, los rangos de clasificación se basaron en la acumulación de unidades calor requeridas para cada etapa de desarrollo de la plaga (Jaramillo *et al.*, 2009; Giraldo-Jaramillo *et al.*, 2018). Para abril y mayo de 2018, las condiciones de acumulación de grados días superaron las 300 unidades calor, particularmente en Atoyac de Álvarez, Coyuca de Benítez, San Luis Acatlán y Malinaltepec en Guerrero, Santiago Nuyoó, Santiago Jamiltepec y Santiago Ixtayutla al poniente de Oaxaca y Ocozocoautla de Espinoza en Chiapas, sitios donde se también se tiene la presencia de la broca de café.



**Figura 3. Grados días de desarrollo para la región de Pacífico Sur.**

Según el boletín epidemiológico núm. 56 del mes de abril (2018) las capturas promedio de adultos por sitio fueron de 76 en Guerrero, 31 en Oaxaca y 152 en Chiapas, mientras que para mayo (boletín núm. 57) hubo 104 capturas en Guerrero, 26 en Oaxaca y 67 en Chiapas. Cabe resaltar que, aunque en estas fechas el cultivo de café su fase fenológica predominante eran brotes y amarre de frutos, represento un riesgo debido al número de adultos capturados. Para el mes de junio de 2018, se presentó una reducción en los grados días de los tres estados, teniendo acumulaciones inferiores a 120 unidades calor.

A pesar de que en este mes la fase fenológica predominante es de amarre de fruto y lechoso, el insecto tiende a abandonar el fruto por su consistencia, generando daños a mayor número de granos (Barrera *et al.*, 2008). En julio de 2018, se observó un incremento en los grados días y aunque solo existieron condiciones para la formación de una generación en los municipios de San Luis Acatlán, Guerrero y Frontera Comalapa y La Concordia en Chiapas.

Representó un riesgo debido a que en el boletín epidemiológico núm. 59 se reportó la captura de 30 adultos en promedio por estado (SENASICA, 2019b), además de que se debe considerar que después de la cosecha, la broca continúa su reproducción en los frutos no cosechados o residuales que se encuentran en la planta y en el suelo (Baker y Barrera, 1993).

De agosto a octubre de 2018, la acumulación de grados días no sobrepasaron las 200 unidades, sin embargo, los reportes de los boletines epidemiológicos (boletín núm. 60, 61 y 62) indican que en estos meses se presentaron los índices más altos de frutos brocados, con un promedio de 8.4 frutos por sitio en Guerrero, 13.7 en Oaxaca y 13.2 en Chiapas. En este periodo, la fase fenológica del café se encontraba predominantemente con frutos consistentes, lo que sugería un riesgo alto de afectación (SENASICA, 2019b).

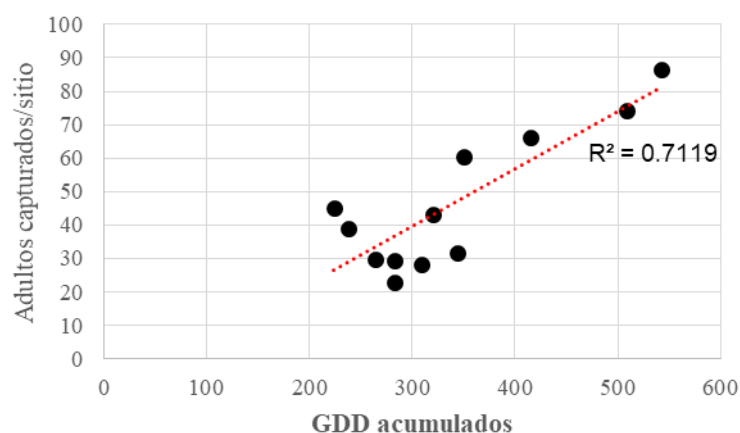
De noviembre de 2018 a marzo de 2019, que es el periodo donde se cosecha la mayor parte del café en la región, la acumulación de unidades calor se incrementó conforme pasaban los meses. De noviembre de 2018 a enero de 2019, por la presencia de frutos consistentes generó que se presentará riesgo principalmente en los municipios de Santa María Tonameca, Santa María Ecatepec y Santo Domingo, Tehuantepec en Oaxaca y Pijijiapan, Mapastepec, Mazatán, Tapachula y La Trinidad en Chiapas, con acumulaciones de grados días superiores a las 350 unidades calor.

En febrero y marzo de 2019, con la reducción de frutos maduros y el aumento de plantas en brotación, el riesgo se redujo; sin embargo, en estos meses se presentaron acumulaciones de unidades calor superiores a las 400 unidades calor en 58% de los municipios que reportan la presencia de la plaga, además de que el promedio de capturas de adultos fue de hasta 80 individuos por sitio (SENASICA, 2019b).

En general, existen dos periodos en la acumulación de grados días de desarrollo, la que comienza de noviembre y finaliza en mayo con condiciones de temperatura que pueden desarrollar más generaciones de la plaga en periodos de tiempo reducidos y la correspondiente de junio a octubre donde la acumulación de unidades calor son menores, alargando los periodos de desarrollo de la broca de café.

De la misma forma, se reconocen dos periodos de la plaga de *H hampei*, uno en el periodo inter cosecha, que va de mayo/junio a octubre, donde los adultos entran en diapausa refugiándose en frutos secos para resistir las condiciones adversas (Baker *et al.*, 1992), mientras que de noviembre a mayo, existe una emergencia de las brocas adultas, las cuales emergen de los frutos maduros y comienzan su vuelo de dispersión hacia otros frutos en floración (de la nueva cosecha de café) lo que da origen a la primera generación del año (Barrera *et al.*, 2006; SENASICA, 2016).

En ambos casos, el riesgo a la broca de café es durante todo el año, uno donde se reproduce y otro donde se dispersa y genera daño al café. Esto se comprueba con los datos de los reportes epidemiológicos generados del programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria de SENASICA, donde el número de adultos capturados en trampas ocurre de enero a mayo y el mayor número de frutos brocados ocurre de julio a octubre (SENASICA, 2019b). Dicha relación, principalmente con los adultos capturados en periodo de dispersión y los grados días de desarrollo se puede observar en la Figura 4.



**Figura 4. Relación entre el promedio de GDD acumulados y el número de adultos capturados por sitio.**

Cuando la cantidad de adultos capturado por sitio está por debajo de los 50, los grados días de desarrollo no sobre pasan las 350 unidades calor, y este comportamiento se da entre los meses de junio de 2018 a enero de 2019, mientras que los meses de abril-mayo de 2018 y febrero-marzo de 2019, la captura de adultos es superior a 60 y las unidades calor se incrementan a más de 350 grados días de desarrollo acumulados.

Se debe de considerar en esta tendencia, la procedencia de los datos comparados, ya que los resultados de los boletines epidemiológicos representan una porción de lo que sucede en las áreas afectadas por la plaga de la broca de café, equivalentes a 2 890 ha (aproximadamente) monitoreadas a partir de trampas, en los tres estados de estudio, mientras que los resultados de las unidades calor son el resultado de los valores de todas las áreas cafetaleras de cada estado.

Además, la resolución espacial de cada una de estas variables es diferente, mientras los datos de grados días de desarrollo representan un área de 1 km<sup>2</sup> por pixel, los datos de captura de adultos son en promedio por parcela. Sin embargo, la temperatura es una variable de importancia para que exista probabilidad de mayor dispersión, reproducción y desarrollo de la broca de café.



Los datos de GDD obtenidos con las imágenes Modis, representan una cobertura espacial continua, particularmente con fenómenos del carácter climatológicos. La temperatura de la superficie de la tierra es un elemento que puede cambiar según la latitud, altitud, tipo de vegetación, etc, esos cambios en la superficie pueden diferenciar a las poblaciones de insectos. Como no se obtuvo datos a nivel de suelo de la temperatura superficial, la confiabilidad de los resultados respecto a las unidades calor puede generar incertidumbre, además de que la mayoría de los estudios de unidades calor se usan datos de estaciones meteorológicas y los valores se interpolan con diferentes métodos.

Sin embargo, Akther y Hassan (2011) obtuvieron una precisión en su clasificación de GDD usando imágenes MODIS de 90.3% al compararlas con datos de estaciones meteorológicas. Hassan *et al.* (2007) evidenció que la precisión con que clasifica los GDD las imágenes MODIS, es superior a 82% de confiabilidad. Para este estudio, los datos de GDD obtenidos de las imágenes no se compararon con datos de estaciones meteorológicas, debido a la ausencia de datos en digital, y los que existían estaban en zonas alejadas de las áreas cafetaleras.

Uno de los beneficios del uso de imágenes Modis para el cálculo de GDD, es la disponibilidad de dichas imágenes, ya que al ser un sensor heliosincrónico, puede capturar varias imágenes en un solo día, así como obtener el recurso del día en transcurso (Wan *et al.*, 2015). Para este estudio, se descargaron imágenes diarias (Mod11A1), aunque existen dentro de los productos MODIS, la MOD11A2 que promedia las imágenes diarias y las presenta como temperatura promedio semanal (8 días). En este caso, Zhang *et al.* (2013) recomienda que para el cálculo de GDD, se usen como temporalidad las imágenes diarias.

## Conclusiones

El café es uno de los cultivos más relevantes de México y el mundo, está asociado a procesos de sustentabilidad, de arraigo cultural y de técnicas tradicionales; sin embargo, el cultivo sufre problemas de índole económico, social, cultural y ambiental, tal es así que su producción ha ido decayendo -3.9% anualmente en los últimos 20 años. Las plagas y enfermedades, asociadas a los cambios climáticos, son problemas que impactan a la caficultura, por lo que crear o aplicar metodologías que ayuden a salvaguardar el cultivo son importantes, más si estas metodologías manejan la variable tiempo y su proceso se puede sistematizar.

Los grados días de desarrollo calculados con imágenes Modis, son un insumo para apoyar los procesos de monitoreo y vigilancia de *H. hampei* o de otras plagas de importancia cuarentenaria o económica. Se ha demostrado que el resultado de GDD para broca de café corresponde con la presencia de adultos por sitio, además de territorializar lugares que tiene condiciones de temperatura adecuados para que se desarrollen una o varias generaciones de la plaga.

En este sentido, los GDD con imágenes Modis espacializan el problema fitosanitario, el cual puede ser relacionado con alguna otra variable espacial relevante. Las imágenes pueden usarse para estimar el número mensual y anual de generaciones de esta plaga, para el uso en programas integrados de manejo de plagas. Según el cálculo, se pueden generar hasta 13 generaciones de *Hypothenemus hampei* en los estados del Pacífico Sur. Municipios con grandes superficies de café están en riesgo ante la presencia del problema entomológico más importante del cultivo. Dicha plaga puede tener periodos extraordinarios de crecimientos poblacionales, los cuales podrían ser monitoreados con estas imágenes y a través de conocer los GDD del insecto.

Esta metodología puede fácilmente incorporarse al programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria del cultivo del café.

## Agradecimientos

Este estudio se desarrolló en el Laboratorio de Prospección Tecnológica para el Desarrollo Innovador de los Alimentos y la Alimentación (PROTEAA) en el marco del proyecto ‘Producción y aprovechamiento del café. Prospección sistémica de la cadena de valor en los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero’ dentro de la convocatoria de proyectos de problemas nacionales 2015 CONACYT registrado bajo el número 1011.

## Literatura citada

- Akther, S. and Hassan, K. 2011. Remote sensing-based estimates of surface wetness condition and growing degree days over northern Alberta, Canada. *Boreal Environ. Res.* 16(5):407-416.
- AMECAFE. 2006. Padrón Nacional de Cafetaleros. Asociación Mexicana de Cadenas Productivas de Café. <https://amecafe.org.mx/>.
- Baker, P.; Barrera, J. and Rivas, A. 1992. Life history studies of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*, Scolytidae) on coffee trees in southern Mexico. *J. Appl. Ecol.* 29(3):656-662.
- Baker, P. and Barrera, J. 1993. A field study of a population of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae), in Chiapas, Mexico. *Tropical Agriculture.* 70(4):351- 355.
- Barrera, J.; Parra, M.; Herrera, O.; Jarquín, R. y Pohlan, J. 2004. Plan estatal de manejo agroecológico del café en chiapas: guía hacia una cafecultura sustentable. Comisión para el Desarrollo y Fomento del Café de Chiapas y El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, Chiapas, México. 164 p.
- Barrera, J. 2005. Investigación sobre la broca del café en México: logros, retos y perspectivas. *In: Simposio sobre Situación Actual y Perspectivas de la Investigación y Manejo de la Broca del Café en Costa Rica, Cuba, Guatemala y México.* Sociedad Mexicana de Entomología-Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, Chiapas, México. 1-13 pp.
- Barrera, J. 2006. Manejo holístico de plagas: hacia un nuevo paradigma de la protección fitosanitaria. *In: Pohlan, J.; Soto, L. y Barrera, J. (Eds.). El cafetal del futuro: realidades y visiones.* Aachen, Shaker Verlag, Alemania. 63-82. p.
- Barrera, J. 2007. Manejo holístico de plagas: más allá del MIP. *In: Memorias del XXX Congreso Nacional de Control Biológico-Simposio de IOBC, Mérida, Yucatán.* 18 p.
- Barrera, J.; Gómez, J.; Castillo, A.; López, E.; Herrera, J. y González, G. 2008. Broca del café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). *In: Arredondo-Bernal, H. C. y Rodríguez-del-Bosque, L. A.* 101-120 p. (Eds.). *Casos de control biológico en México.* Mundi-Prensa, México, DF. 423 p.
- Bernardes, T.; Moreira, M.; Adami, M.; Giarolla, A. and Theodor, B. 2012. Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing.* 4(9):2492-2509.
- Brunsell, N.; Pontes, P. and Lamparelli, R. 2009. Remotely Sensed phenology of coffee and its relationship to yield. *GIScience Remote Sensing.* 46(3):289-304.
- CABI. 2018. *Coffea* (coffee). Invasive species compendium. Centre for Agricultural Bioscience International. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/14791>.

- Camilo, J.; Olivares, F. y Jiménez, H. 2003. Fenología y reproducción de la broca de café (*Hypothenemus hampei*) durante el desarrollo del fruto. *Agron. Mesoam.* 14(1):59-66.
- Chemura, A. and Mutanga, O. 2017. Developing detailed age-specific thematic maps for coffee (*Coffea arabica* L.) in heterogeneous agricultural landscapes using random forests applied on Landsat 8 multispectral sensor. *Geocarto International.* 32(7):759-776.
- CNRF-VEFCC. 2018. Manual técnico operativo 2018, para la vigilancia fitosanitaria en el cultivo del café. Dirección General de Sanidad Vegetal-SENASICA. <https://prod.senasica.gob.mx/sirvef/contenidopublico/roya%20cafeto/estrategia%20operativa/manualoperativoroyacafeto.pdf>.
- Cordero, S. and Sader, S. 2007. Spectral analysis and classification accuracy of coffee crops using Landsat and a topographic-environmental model. *Inter. J. Rem. Sensing.* 28(7):1577-1593.
- Covaleda, S.; Aguilar, S.; Ranero, A.; Marín, I. y Paz, F. 2014. Diagnóstico sobre determinantes de deforestación en Chiapas. Alianza México para la reducción de emisiones por deforestación y degradación. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php).
- Damos, P. 2015. Modular structure of web-based decision support systems for integrated pest management. *Agron. Sustainable Development.* 35(4):1347-1372.
- Decoro, G.; Trindade, M. and Vieira, B. 2017. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. *IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Observations Remote Sensing.* 10(12):5395-5403.
- DOF. 2001. Norma Oficial Mexicana NOM-002-FITO-2000. Campaña contra la broca de café. *Diario Oficial de la Federación.* México, DF. 1-9 pp.
- Giraldo-Jaramillo, M.; García, A. y Parra, R. 2018. Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the State of São Paulo, Brazil. *J. Econ. Entomol.* 111(5):2192-2200.
- Haggar, J.; Medina, B.; Aguilar, R. y Muñoz, C. 2013. Land use change on coffee farms in southern Guatemala and its environmental consequences. *Environmental Management.* 51(4):811-823.
- Hassan, Q.; Bourque, C.; Meng, F. and Richards, W. 2007. Spatial mapping of growing degree days: an application of MODIS-based surface temperatures and enhanced vegetation index. *J. Appl. Remote Sensing.* 1(1):1-12.
- Higuera, I. y Rivera, J. 2018. Chiapas: problemáticas del sector cafetalero. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, AC. 112 p.
- Jaramillo, J.; Chabi-Olaye, A.; Kamonjo, C.; Jaramillo, A.; Vega, F.; Poehling, H. and Borgemeister, C. 2009. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS ONE*, 4(8):e6487.
- Libert, A. y Paz, F. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del café en Chiapas. *Madera y Bosques.* 24(spe):1-24.
- Maiorano, A. 2012. A physiologically based approach for degree-day calculation in pest phenology models: the case of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in northern Italy. *Inter. J. Bio.* 56(4):653-659.
- Oerke, E. 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144(1):31-43.
- Ramírez, M.; González, M.; Bello, A. y Romero, S. 2007. Campaña nacional contra la broca de café en México: operaciones y perspectivas. *In: la broca de café en América tropical: hallazgos y enfoques.* Barrera, J. F.; García, A.; Domínguez, V. y Luna, C. (Eds.). Sociedad Mexicana de Entomología y el Colegio de la Frontera Sur. México. 73-81 pp.

- Romero, J.; Cortina, H. and Alfonso, H. 2007. Life tables of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on three coffee accessions. Rev. Colomb. Entomol. 33(1):10-16.
- Ruiz, J.; Bravo, E.; Ramírez, G.; Báez, A.; Álvarez, M.; Ramos, J.; Nava, U. y Byerly, K. 2013. Plagas de importancia económicas en México: aspectos de su biología y ecología. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental. Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Libro técnico núm. 2. 447 p.
- SENASICA. 2016. Ficha técnica de la broca de café. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Secretaría de Desarrollo Rural (SADER). <https://www.gob.mx/senasica/documentos/ficha-tecnica-broca-del-cafe>.
- SENASICA. 2018. Informe y evaluaciones de la campaña contra la broca de café. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Secretaría de Desarrollo Rural (SADER). <https://www.gob.mx/senasica/documentos/informes-y-evaluaciones-2018-bc>.
- SENASICA. 2019a. Mapa dinámico fitosanitario-broca de café (*Hypothenemus hampei*) en México. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Secretaría de Desarrollo Rural (SADER). <http://sinavef.senasica.gob.mx/MDF/>.
- SENASICA. 2019b. Boletín epidemiológico-fitosanidad del cafeto, situación epidemiológica de la roya del cafeto y otros riesgos fitosanitarios asociados al cultivo del cafeto en nueve estados productores. Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. SADER-SENASICA-DGSV, México, DF. <http://www.royacafe.lanref.org.mx/>.
- SIAP. 2018. Cierre de la producción agrícola-café cereza. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- SIAP. 2019. Estacionalidad por año agrícola-café cereza. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://infosiap.siap.gob.mx/estacionalidad-gb/est-agricola-AA/index.php>.
- SIACI. 2018. Estadísticas anuales-capítulo 0901. Sistema de Información Arancelaria Vía Internet. <http://www.economia-snci.gob.mx/>.
- Snyder, R. 1985. Hand calculating degree days. Agric. Forest Meteorol. 35(1-4):353-358.
- Wan, Z.; Hook, S. and Hulley, G. 2015. Mod11a1 modis/terra land surface temperature/emissivity daily l3 global 1km sin grid v006 [Data set]. Nasa Eosdis Lp Daac.
- Zhang, L.; Huang, J.; Guo, R.; Li, X.; Sun, W. and Wang, X. 2013. Spatio-temporal reconstruction of air temperature maps and their application to estimate rice growing season heat accumulation using multi-temporal MODIS data. J. Zhejiang University-Science B. 12(2):144-161.