

Implicaciones de la Producción de Aguacate en el Balance Hídrico desde una Perspectiva de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), 2011-2019

Avocado Production Implications at Water Balance since a Geographic Information Systems (GIS) Perspective, 2011-2019

Gerardo Ruíz-Sevilla¹
Carlos Francisco Ortiz-Paniagua²

Recibido: 20 de julio de 2021 Aceptado: 18 de octubre de 2021
DOI: <https://doi.org/10.33110/cimexus160201>

RESUMEN

A nivel mundial 0.77% del agua dulce disponible es accesible para el ser humano (Harrison y Pearce, 2000), aproximadamente 70% de ésta se destina como insumo para la agricultura (CONAGUA, 2018), misma que responde a la creciente demanda mundial de alimentos. En particular, la producción de un aguacate requiere 227.1 litros de agua (WFN, 2015). La creciente demanda mundial por dicho fruto ha llevado al crecimiento exponencial de la superficie cultivada en Michoacán, los efectos en el balance hídrico ya son notorios. El objetivo del presente, fue estimar los efectos del cultivo de aguacate en el balance hídrico de Tancítaro en Michoacán para el período 2011-2019, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e indicadores de producción, se muestra un déficit hídrico atribuible en parte a la producción de aguacate, dado que 57% de la precipitación pluvial anual equivale a las necesidades de insumo para producción de dicho cultivo.

PALABRAS CLAVE: Balance Hídrico, SIG (GIS), Agricultura, Aguacate, Tancítaro.

1 Doctorando en Ciencias del Desarrollo Regional del Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales (ININEE) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Correo electrónico: gruizs@umich.mx ORCID ID: 0000-0002-3049-2320.

2 Profesor e investigador de Tiempo Completo del ININEE/UMSNH. Correo electrónico: carlos.ortiz@umich.mx ORCID ID: 0000-0003-3645-1527.

ABSTRACT

Worldwide 0.77% of available fresh water is accessible to humans (Harrison and Pearce, 2000), approximately 70% of it is used as input for agriculture (CONAGUA, 2018), which responds to the growing global demand for foods. In particular, the production of an avocado requires 227.1 liters of water (WFN, 2015). The growing world demand for this fruit has led to the exponential growth of the cultivated area in the last 15 years in Michoacán, the effects on the water balance are already significant. The aim of this study was to estimate the effects of avocado cultivation on the water balance in a Michoacan province of Tancitaro, during 2011-2019. Using Geographic Information Systems (GIS) and production indicators, it is shown a water deficit attributable in part to avocado production, with 57% of the annual rainfall is equivalent to the input needs for the production of said crop.

KEYWORDS: Water Balance, GIS (GIS), Agriculture, Avocado, Tancitaro.

INTRODUCCIÓN

La agricultura convencional, extensiva y destinada al cultivo de exportación, constituye uno de los elementos que más efectos negativos tiene degradando la calidad ecológica, principalmente por el cambio de uso de suelo, pero especialmente contribuye al deterioro en la cantidad del agua disponible, presionando las capacidades de producción del agua (Nery, Fuentes, Dorta, Jiménez & Tejedor, 2020; Cuevas, Garrido & González, 2010; Chávez, et. al., 2009). El aumento de tierras agrícolas tiene su origen en la demanda de alimentos, mismos que al ser producidos promueven el excesivo aprovechamiento de recursos naturales y originan un impacto negativo en los ecosistemas naturales, afectando directamente la capacidad de estos de proveer bienes y servicios ambientales (Leija, E. G. et al 2020:1) como efecto del crecimiento poblacional y económico.

Se tienen tres fuentes de crecimiento en la producción de cultivos: 1) el incremento de la frecuencia de las cosechas, 2) el aumento de los rendimientos y 3) el aumento de la tierra cultivada. Este último aspecto continuará creciendo hasta 1,660 millones de hectáreas para el año 2050, y se prevé que la mayor parte de este crecimiento provendrá de los países en desarrollo, lo que sugiere que se podría estar llegando al límite de las posibilidades (FAO, 2002). La tercera fuente implica el aumento en la tasa de deforestación, fenómeno que ocurre a diferentes escalas y suscita múltiples impactos, reflejados en procesos hidrológicos, en el propio funcionamiento de los ecosistemas, la regulación del clima y las actividades socioeconómicas (Nery, Fuentes, Dorta, Jiménez & Tejedor, 2020; Leija, E. G. et al 2020 & Bonilla-Moheno, Aidé y Clark, 2012).

Por su parte, Santillán-Fernández, et al (2020), trabajaron con índices de humedad a partir de datos climáticos en áreas de bosque mesófilo de montaña dentro de la región Huasteca, el cual se caracteriza por ser un buen captador de agua. Sin embargo, a causa de las actividades antropogénicas, sobre todo la agricultura; la cobertura forestal ha disminuido impactando negativamente en la captación de agua. Los resultados muestran que el índice de humedad disminuyó como consecuencia de más del 29% de deforestación. Se recomienda la conservación de este ecosistema como prioritario para mejorar la cantidad de agua en la región.

También se ha encontrado que se realiza un balance hidrológico en la cuenca del Río Milagro, utilizando herramientas SIG con cartografía de edafología y usos de suelo aunados a datos meteorológicos de precipitación y temperatura, obteniendo como resultados que cerca del 76% de la zona presenta un déficit hídrico causado por el cultivo de cacao, caña y banano principalmente (Alvarado, 2020).

Los cambios en la cobertura vegetal y el uso de suelo tienen afectaciones en los servicios ecosistémicos como (Cayuela, Benayas, Justel & Salas-Reyes 2006: 602):

- a) alteración del ciclo hidrológico, aumentando la escorrentía, impidiendo la infiltración del agua a mantos freáticos y generando erosión e inundaciones
- b) pérdida de la biodiversidad (flora y fauna);
- c) alteración de los ciclos biogeoquímicos;
- d) alteración del clima local y global, a causa de la liberación de gases de efecto invernadero y,
- e) cambios físicos y químicos en los suelos, como reducción de la fertilidad y pérdida nutrientes de los suelos.

El cambio de cobertura vegetal y la expansión de la frontera agrícola se aprecia en el estado de Michoacán con el cultivo de aguacate hass (*Persea americana*), particularmente en Tancítaro, este municipio se sitúa en el Cinturón Volcánico Transmexicano, en la parte Centro-Oeste de Michoacán y destaca por la presencia de la mayor elevación en la entidad: “El Pico de Tancítaro”. En esta, como en otras regiones se ha ignorado, o infravalorado, el valor ecosistémico de los bosques para la provisión de agua, principalmente como insumo agrícola. Dado que el municipio cuenta con las condiciones para producir en calidad y en cantidad el fruto el municipio es el primer productor estatal de aguacate hass, contribuyendo como detonante económico en la región (Gutiérrez-Contreras, et. al., 2010: 649). A su vez, el aguacate es el cultivo más demandante del recurso hídrico.

Ante este panorama, ¿Cuál es el impacto que ha tenido la producción de aguacate en el Balance Hídrico (BH) en el municipio de Tancítaro, Michoa-

cán? Teniendo como objetivo estimar la alteración del VH en el municipio de Tancítaro, como consecuencia del cambio de la cobertura vegetal por el cultivo de aguacate. Para alcanzar el objetivo, se emplean los Sistema de Información Geográfica (SIG) y los índices de producción de aguacate en el municipio. De esta manera, el presente artículo se integra en seis apartados: 1) análisis contextual, 2) caracterización del área de estudio, 3) materiales y métodos, 4) resultados, 5) discusión de los mismos y, 6) conclusiones.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. EL MUNICIPIO DE TANCÍTARO, MICHOACÁN

Tancítaro posee una superficie de 715.056 km², lo cual representa 1.22% de la superficie del estado y tiene una población de 31,100 habitantes (0.67% de Michoacán) (INEGI, 2015). Las coordenadas de ubicación son: UTM mínimas: X= 762557.59 y Y=2122112.02 y máximas: X= 795089.85 y Y= 2162107.23, la altitud va de 820 m.s.n.m. a 3840 m.s.n.m. También forma parte de la conocida franja aguacatera, que se ha extendido aceleradamente, el cultivo de aguacate se encuentra presente en 53 de los 113 municipios del estado (SIAP, 2018) (Mapa 1).



Fuente: Elaboración propia en Corel Draw 2019

En la parte más alta del municipio se encuentra el Área de Protección de Flora y Fauna (APFFPT) la cual tiene una superficie total de 234.0592 km² y abarca los municipios de Tancítaro, Peribán, Nuevo Parangaricutiro y Uruapan. Dicha APFFPT fue establecida el día 19 de agosto del 2009. Su principal objetivo es constituir el instrumento rector de planeación y regulación para el manejo y la administración del Área Natural Protegida (ANP) (DOF, 2013, p2).

La región también es reconocida como área de importancia para la conservación de las aves (AICA número C05) y además como Región Terrestre Prioritaria número 114 (RTP-114). En este lugar existen bosques de pino de altura, oyameles, encinos, pinos de diversas especies, pastizales y agricultura de temporal en las zonas bajas. También es considerada como la zona productora de aguacate más importante del país, y forma parte de la denominada: “Franja aguacatera” cuyas formas de producción agrícola demandan una gran cantidad de agua (Fuentes, 2011, p. 33).

PRESIÓN SOBRE EL CONSUMO DE AGUA Y DETERIORO ECOLÓGICO. EFECTOS DEL CULTIVO DE AGUACATE EN EL MUNICIPIO DE TANCÍTARO

De acuerdo a la Water Footprint Network (WFP) se necesita un promedio de 227.12 litros de agua para la producción de un aguacate (WFPN, 2015). En tanto que una hectárea de terreno cultivado con 156 árboles de *Persea americana* puede llegar a consumir hasta 9,717.90 litros de agua diariamente (Gómez-Tagle, 2018). Aunado a esta actividad económica, existen otros factores adversos al uso de agua; como la contaminación por agroquímicos, para elevar el rendimiento y mantener un óptimo crecimiento de las plantas que al aplicarles pesticidas y fertilizantes químicos, dañan no solo la estructura química del suelo, sino también al agua superficial y aquella que logra filtrarse hacia los mantos acuíferos (FAO, 2002).

Otro factor, lo constituye el cambio de uso de suelo, en un estudio sobre la cobertura vegetal durante el período 2004-2014, se muestran los cambios ocurridos y asigna una etiqueta de cobertura vegetal a los cultivos perenes correspondientes a las huertas de aguacate. La superficie reportada haciende a poco más de 30,000 has para el último año (Mas, 2016). Si consideramos que bajo ciertas condiciones una hectárea cultivada de aguacate hass (*Persea americana*) puede llegar a consumir más de 9,000 litros diarios, significaría una cantidad considerable de agua promedio consumida solo para el riego de huertas de aguacate, aunado a la transpiración de este tipo de cultivos que es más alta que un bosque de pino-encino. Esta dinámica acelera el consumo de agua considerando que la evapotranspiración aumenta conforme lo hace también la temperatura; es decir, las plantas demandan mayor cantidad de agua conforme se eleva el calor del ambiente (Gómez-Tagle, 2018:1-2).

En la región se encuentra una excepcional cantidad de agua, misma que se produce en el “Área de Protección de Flora y Fauna” Pico de Tancítaro,

dentro de esta área natural protegida se localiza la elevación más alta en el estado (3,800 m.s.n.m.), El “Pico de Tancítaro”. Este macizo montañoso es una entidad hidrológica, que constituye la base del desarrollo de 81 poblaciones y comunidades, siendo para el aguacate, una de las áreas más importantes del país en la producción del mismo (INEGI, 2015). Aquí se reportan cerca de 30 millones de m³ anualmente, beneficiando de esta manera a las actividades agrícolas y uso doméstico de los habitantes (Fuentes, 2004: 80). Es claro que esta agua se “produce” en esta prominencia, pero también es evidente que quien tiene mayor demanda de uso de este recurso líquido, es la agricultura, principalmente para el riego de aguacate.

Se ha reportado una sobreexplotación de estas fuentes que está conllevando a una reducción de la disponibilidad de agua (Fuentes, 2011: 33), esta se acentúa con las malas prácticas de distribución, como el reparto con canales con y sin revestimiento; escenario que es agravado por el incremento de la demanda del vital líquido por parte de los usuarios agrícolas, pues existe un sistema de disposición de agua que se esparce de modo que los productores reciben el agua con una confiabilidad dependiente de la ubicación de su predio en el método de reparto (Escobar y Jaramillo, 2007, p. 18).

A fin de buscar una solución a los problemas del agua y la deforestación, durante el año de 2003, la Federación puso en práctica el programa denominado: “Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos” (PSAH) que tenía como propósito incentivar económicamente a los propietarios de los bosques procurando que las soluciones de uno de los problemas también contribuyan a resolver algunos otros (Muñoz, 2007: 79). Los resultados no llegaron a ser los esperados, dado que no se ha logrado detener el cambio de uso de suelo, sino por el contrario la condición del pago generó la inconformidad en los ejidatarios michoacanos que recibieron en 2019 entre \$380 y \$800 por hectárea mientras que en el Estado de México se paga casi \$1,600.00/ha de bosque al año (Molina, A. 2019). Así mismo y como otra forma de procurar una solución a los problemas ambientales, sobre todo de bosque y agua, fue la declaración del Pico de Tancítaro como “Área de Protección de Flora y Fauna” de carácter Federal y creada mediante decreto presidencial el 19 de agosto de 2009 en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2009).

Pero esto no ha sido suficiente, dada la situación de un producto tan demandado y de requerimientos hídricos elevados es de vital importancia conocer la revisión espacial y temporal del balance hídrico de la región, puesto que este determina la mejor y mayor productividad; además de otros factores. Su establecimiento mediante la modelación y simulación espacio temporal permite comprender y apreciar los mejores sitios con disponibilidad hídrica acorde al tipo de cultivo y otros elementos geográfico - ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente se realizó un modelamiento espacio temporal del periodo comprendido del 2011 al 2019 basado en lecturas de temperatura, precipitación y evapotranspiración obtenidas con el software ClimatENA V 6.30. Algunas investigaciones similares las podemos ubicar con trabajos como el de Camacho, (2020), quién establece 58 áreas de influencia climática a partir de la generación de un algoritmo basado en el método de Thornthwaite. Estas zonas muestran incrementos en el déficit y disminución en el excedente de agua en 75.6 y 283.5 milímetros anuales, respectivamente.

Se establecieron 11 áreas con alta importancia hídrica conformadas principalmente por bosques de Oyamel (*Abies religiosa*). Otros autores como Martín et al (2015) realizan una comparación entre tres métodos para calcular el balance hídrico en la cuenca de la Presa Calles, ubicada en la Sierra fría del estado de Aguascalientes, donde se sitúa la principal fuente hídrica del acuífero interestatal "Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación". Los resultados obtenidos muestran que La mejor estimación de la disponibilidad hídrica se obtuvo usando el método B.H. † Hargreaves-Samani, (1985) sobre los métodos de Thornthwaite (1948) y Blaney-Criddle, citado por Dunne y Leopold, (1978), por lo que este puede ser utilizado en sitios donde no puedan obtenerse mediciones directas.

Existen diversos métodos para determinar un balance hídrico, (Alvarado & Barahona-Palomo, 2017 y Sokolov, 1981) considerando siempre que las variables más importantes a medir son la precipitación y la evapotranspiración dado que representan el ingreso y el egreso del agua, mismas que utilizaremos en este modelo e insertándolas en un software especializado en algebra de mapas, incluyendo datos básicos como temperatura, precipitación y evapotranspiración.

Con el apoyo y uso de técnicas y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) se generó información de datos geográficos del balance hídrico. Se desarrolló en coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) con las siguientes características: WGS_1984_UTM_Zone_13N. Proyección Transversa de Mercator. A partir de los datos vectoriales altitudinales se formaron los insumos primarios: un TIN (redes irregulares de triángulos), estas son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices como medio digital para representar la morfología de la superficie y un Modelo Digital de Elevación (DEM) a partir de información altimétrica, escala 1:50,000 con resolución de 10x10/celda (Cell Size X, Y).

Los datos vectoriales que se utilizaron para acoplar a la imagen ráster fueron obtenidos de las cartas E13B28, E13B29, E13B38, E13B39, E13B48 y E13B49 del INEGI (2014), escala 1:50,000 representando los principales

rasgos: límite municipal, localidades, manantiales, principales escorrentías y datos altitudinales (Ramos, 2015).

El Balance Hídrico (BH) se refiere a la relación entre la ganancia y pérdida de agua en forma de precipitación, evapotranspiración y escorrentía (flujo superficial y subterráneo) que ocurre en una región en particular (Murat, 1998, p. 405) y se calculó mediante la siguiente ecuación (Ecuación.1):

$$BH = Pp_{Med} - (ETP * Temp_{Med}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

BH = Balance Hídrico

PpMed = Precipitación Media Anual (mm)

ETP = Evapotranspiración potencial (mm)

TempMed = Temperatura media anual (°C)

Para estimar y representar en un mapa, se utilizó información proporcionada por CONAGUA para el periodo 1969 - 2019 para los parámetros de precipitación (Pp), temperatura (Temp) y evapotranspiración (ET) tomados a partir de datos meteorológicos de las estaciones que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.			
Estaciones meteorológicas			
Clave	Estación	Clave	Estación
16011	Buena Vista I	16146	Zirahuén, Salvador Escalante
16216	Buena Vista II	16178	Uruapan, Uruapan
16039	Piedras Blancas, Buenavista, Tomatlán	16228	Acahuato, Apatzingán
16056	Jicalán, Uruapan	16251	Patamban, Tangancicuaro
16072	Los Chorros del Varal, Los Reyes	16253	Tanaco, Cherán
16085	Parácuaro, Parácuaro	16259	Tzindio, Nuevo Parangaricutiro
16088	Peribán, Peribán	16261	Chilatán, Jalisco
16118	Santa Fe, Quiroga		

Fuente: CONAGUA, 2020

Esta información fue complementada con el software ClimatENA V 6.30 2020, a partir de un mapa de 70 puntos (estaciones) (Tabla A1, anexo metodológico) distribuidos dentro del polígono de estudio (municipio) Wang et al. (2016). Se utilizaron las variables de Precipitación Media (PpMed), Temperatura Media (TempMed) y Evapotranspiración Potencial (ETP).

Esta información se integró y georreferenció en ArcMap V. 10.5 representándola espacialmente y haciendo una unión de datos con las tablas de PpMed y TempMed. A partir de este resultado se elaboraron los mapas de los parámetros climáticos de precipitación y temperatura a escala 1:50,000 y se rasterizaron a 10m/pixel de cada uno. Con los insumos generados, se procedió a la formación de un mapa de isoyetas y uno de isotermas que representan la precipitación y temperatura respectivamente en una unidad de tiempo considerada, sobre una superficie.

Previamente se realizó una interpolación de tipo "Spline" (Ecuación 2) con cada uno de los datos, para estimar los valores, empleando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, dando como resultado una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (Esri, 2016). Ajusta una función matemática a un conjunto específico de puntos de entrada más cercanos mientras pasa a través de estos, este método es mejor para generar superficies que varían entre ellos levemente, como la elevación, la temperatura, la precipitación o las concentraciones de contaminación y se determina con la ecuación de Spline. El procedimiento aplica en ambos mapas diferenciando la precipitación de la temperatura (Franke, 1982, p. 274).

$$S(x,y) = T(x,y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \text{ (Ecuación 2. Spline)}$$

Donde:

$j = 1, 2, \dots, N$.

N = es la cantidad de puntos.

λ_j = son coeficientes determinados por la solución de un sistema de ecuaciones lineales.

r_j = es la distancia del punto (x, y) al punto j .

$T(x,y) = a_1$ y es un coeficiente determinado por la solución de un sistema de ecuaciones lineales.

$$R(r) = -\frac{1}{2\pi\varphi^2} \left[\ln\left(\frac{r\varphi}{2}\right) + c + Ko(r\varphi) \right] \text{ Ecuación (3). Spline con Tensión}$$

Donde:

r = es la distancia entre el punto y la muestra.

φ^2 = es el parámetro a medir (Precipitación/temperatura).

Ko = es la función de Bessel modificada.

c = es una constante igual a 0.577215 dentro del algoritmo que utiliza la herramienta Spline.

A partir de este procedimiento, se obtuvieron los mapas de isoyetas e isothermas, que son isolíneas que unen puntos en un plano cartográfico y que presentan la misma precipitación (mm) / temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en una unidad de tiempo considerada. Estos fueron calculados con intervalos de 100 m de altitud y 2°C respectivamente mediante una herramienta de álgebra de mapas que permite obtener como salida un mapa ráster (Esri, 2019). Con esta misma herramienta se procedió a formar el mapa de BH utilizando la Ecuación 1 y que corresponde al cruce del mapa de PpMed sobre el de ETP aplicando álgebra de mapas para cada celda, este último dato es la constante de Hollis equivalente a 58.93.

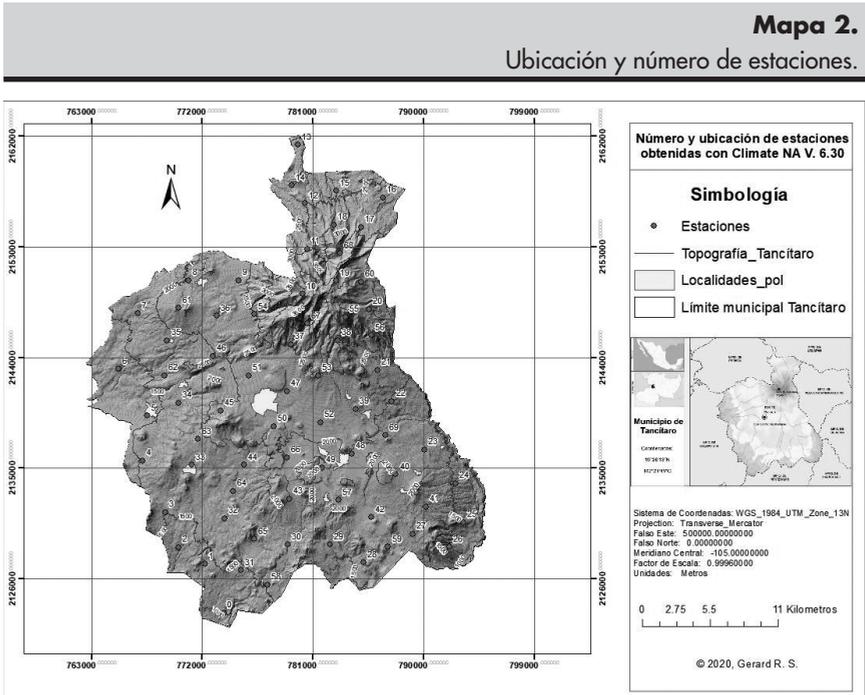
CÁLCULO DE AGUA PARA EL CULTIVO DE AGUACATE

La producción de un aguacate precisa de 227 litros de agua y este requiere de tres aguacates para componer un kilogramo, significarían aproximadamente 680 litros para producir un kilogramo y 680 mil litros para una tonelada (considerando una relación lineal). En principio, en la producción de aguacate, si 67% de la producción es agua (Martínez, Barranco y Moreno, 1992), entonces se debe considerar que el agua, por una parte, ayuda como insumo a la producción y por otra parte se va integrada en el producto. Por otro lado, el agua proveniente del ciclo hidrológico regional, equivalente a 670 litros, es decir 1% de la requerida para su producción, sin considerar el agua retenida por productores agrícolas.

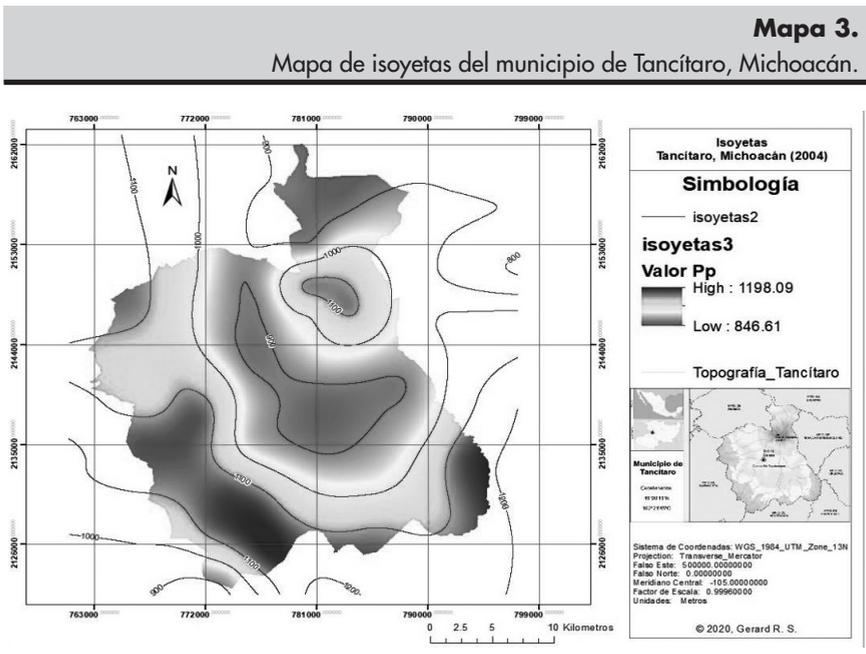
RESULTADOS

Implicaciones de la producción de aguacate en el BH para tancítaro Balance hídrico.

El Mapa 2 expone las estaciones generadas con el software ClimatENA V 6.30. En este se muestra el número y distribución espacial en el municipio de Tancítaro, Michoacán. En continuidad con el empleo del álgebra de mapas se obtuvo el mapa de isoyetas que indica la cantidad de precipitación (PP) representada en milímetros de agua o litros caídos por unidad de superficie en m^2 , dicho de otra forma, es la lámina de agua que permanece en el suelo y se mide en milímetros o lt/m^2 . En el Mapa 3 de isoyetas, la coloración en rojo simboliza aquellas zonas donde la precipitación es menor mientras que las partes en color azul se alcanzan las mayores precipitaciones y mayor humedad, correspondiendo así a las zonas de menor y mayor altitud respectivamente. En otras palabras, la posibilidad de lluvia en el ANP es más probable que en las zonas de menor altitud.



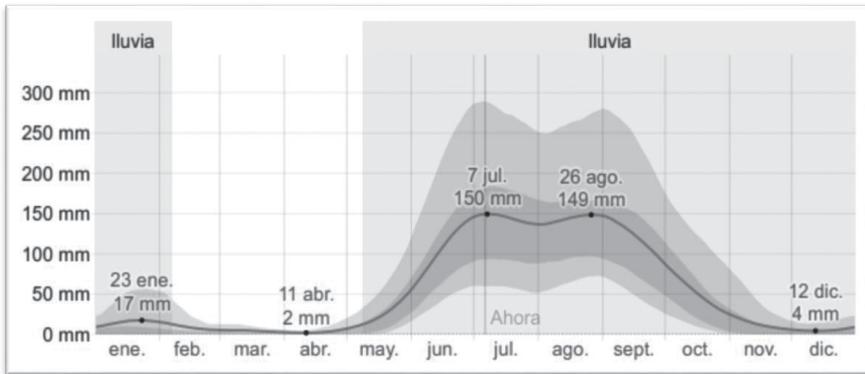
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos con el software Climate NA V 6.30



Fuente: elaboración propia con datos de ClimateNA v6.30 (2020)

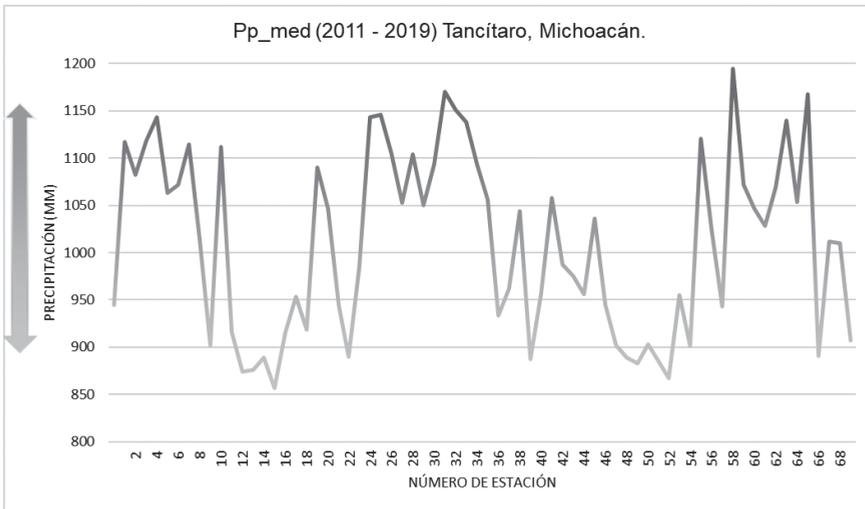
Tancítaro muestra una variación extrema de lluvia mensual por estación. La temporada de lluvia dura poco más de ocho a nueve meses, durante los meses de mayo a enero, con precipitaciones mínimas de por lo menos 12 a 17 mm, mientras que la mayoría de la lluvia cae mayormente en los meses de julio y agosto, con una acumulación total promedio de 150 mm (Figura 1).

Figura 1.
Precipitación acumulada anual para Tancítaro, Michoacán.



Fuente: Weatherspark, 2020.

Figura 2.
Precipitación media para el periodo 2011 a 2019.

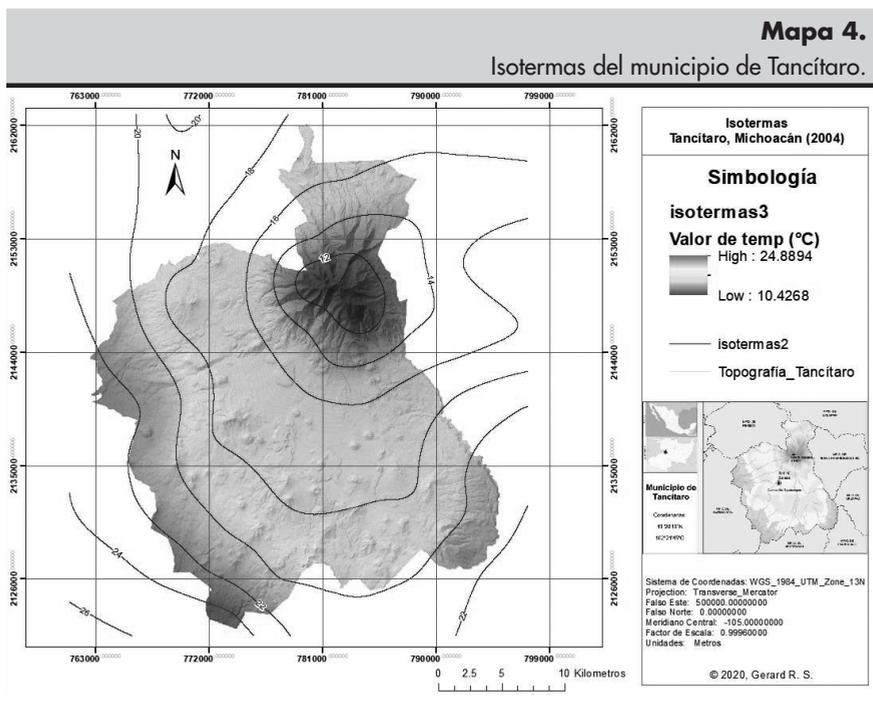


Fuente. Elaboración propia con datos de ClimateNA.

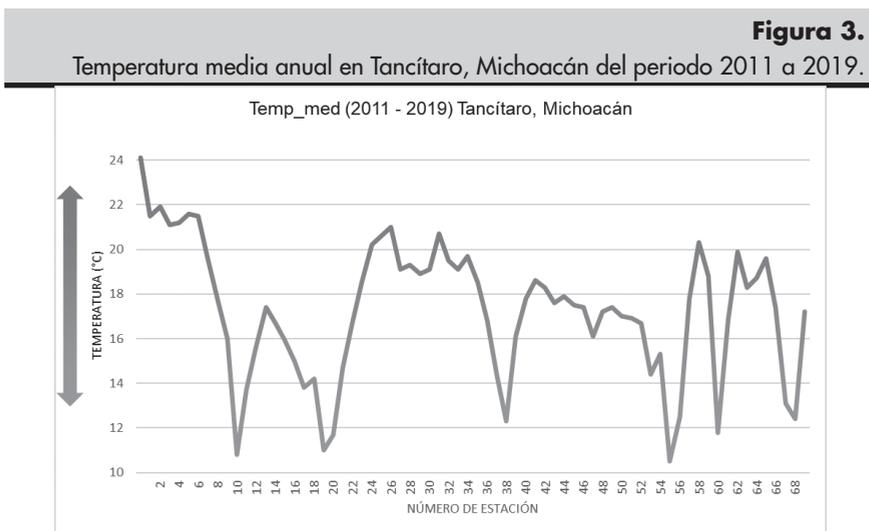
En tanto que la Figura 2, muestra una precipitación distribuida en el municipio de Tancítaro, con valores mínimos de 857 mm en las zonas donde se distribuye la mayoría de las huertas de aguacate y los valores máximos de 1,195 mm sobre todo en las partes altas del ANP. El Mapa 3, correspondiente a las isotermas muestra un gradiente más homogéneo donde se observa un rango de temperatura de los 10 a 24 °C promedio anual. Las menores temperaturas se encuentran a altitudes de 2,500 m.s.n.m. (coloración en azul). Mientras que las zonas de mayor calor se encuentran entre los 1,000 m.s.n.m. (coloración en rojo).

La temperatura durante el transcurso del año, generalmente pueden llegar a variar de 4 °C a 24 °C y rara vez baja a menos de 1 °C (en las partes más altas) o sube a más de 30 °C sobre todo en altitudes de 1,500 a 2,000 msnm, justo donde se distribuyen la mayor parte de las huertas.

La precipitación y la temperatura son factores climáticos que aunados a las características físicas del terreno han permitido una alta producción de aguacate, impulsando al estado, mismo que se activó económicamente después de la firma de TLCAN, posicionando al aguacate como una de las frutas preferidas en el mundo, y sobre todo en el país vecino aumentando el consumo anual per cápita de 0.5 kg en 1994 a 3.5 kilos en 2018 (Estrada, C. 2020).



Fuente: Elaboración propia con datos generados en ClimateNA V6.30 (2020)



Fuente. Elaboración propia con datos de ClimateNA V6.3 (2020).

La mayor parte de la producción en el estado tiene un rendimiento de 7.0 toneladas por hectárea, mientras que en el municipio de Tancítaro es de 8.0, este último en una superficie promedio cosechada durante el periodo del 2010 al 2020, mismo que analizando la siguiente Tabla (3) se observan variaciones que posiblemente dependan de la tecnología utilizada y las condiciones meteorológicas. La tasa promedio de crecimiento anual de producción de aguacates de 2010 a 2019 fue de 3.51% lo que expone el interés por esta fruta (SIAP, 2020).

El crecimiento de la cobertura vegetal de las huertas de aguacate aumenta la probabilidad de que se pierdan zonas de captación de agua. Al mismo tiempo que de la conversión de tierras que estaban dedicadas a cultivos como el maíz a huertas de aguacate, significando un aumento en el consumo de agua. En términos económicos la producción de aguacate representa un promedio de valor de producción de \$2,313,202.47 (miles), en tanto que el consumo de agua promedio para esa producción se estima en: 309,114,000.00 m³ para el periodo 2010-2020.

Tabla 2.

Siembra, cosecha y producción de aguacate, Michoacán y Tancítaro, 2010-2020.

	Periodo	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Valor de la Producción (miles de pesos)
		sembrada	cosechada			
Michoacán	2020	169,939.00	165,574.00	1,009,436	6.10	\$ 39,116,867.8
	2019	167,745.00	159,119.00	1,000,927	6.29	\$ 39,116,867.8

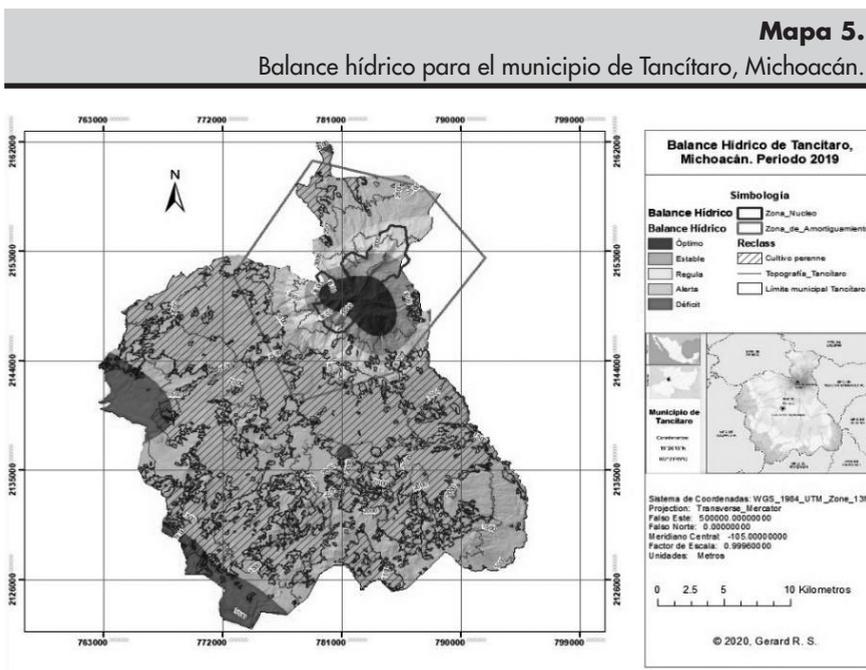
Tabla 2.						
Siembra, cosecha y producción de aguacate, Michoacán y Tancítaro, 2010-2020.						
Periodo	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Valor de la Producción (miles de pesos)	
	sembrada	cosechada				
Michoacán	2018	166,512.00	151,268.00	992,816	6.56	\$ 34,405,175.9
	2017	159,328.00	146,586.00	840,122	5.73	\$ 32,823,118.0
	2016	147,720.00	123,666.00	808,577	6.54	\$ 25,260,958.7
	2015	134,632.00	100,789.00	808,409	8.02	\$ 18,272,683.4
	2014	127,084.00	100,510.00	837,538	8.33	\$ 17,452,759.2
	2013	122,251.00	105,161.00	818,989	7.79	\$15,509,565.2
	2012	112,671.00	101,228.00	775,800	7.66	\$ 14,835,697.4
	2011	108,678.00	102,680.00	665,275	6.48	\$ 16,453,977.7
	2010	107,058.00	101,870.00	656,109	6.44	\$ 12,640,768.3
	Promedio del 2010 al 2020	138,511	123,496	837,636	7.00	\$ 22,677,157.2
Tancítaro	2020	22,940.00	22,940.00	128,130	5.59	
	2019	23,650.00	23,650.00	131,388	5.56	\$2,267,100.00
	2018	23,650.00	23,400.00	157,000	6.71	\$2,005,768.80
	2017	23,375.00	23,375.00	133,405	5.71	\$2,189,737.00
	2016	22,417.00	22,417.00	153,207	6.83	\$2,241,424.00
	2015	21,750.00	16,300.00	162,138	9.95	\$2,077,030.00
	2014	21,600.00	18,000.00	181,401	10.08	\$2,707,457.89
	2013	20,760.00	18,164.00	182,012	10.02	\$2,870,775.53
	2012	19,254.00	18,620.00	186,200	10.00	\$2,669,524.68

Tabla 2.
Siembra, cosecha y producción de aguacate, Michoacán y Tancítaro, 2010-2020.

Periodo	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	Valor de la Producción (miles de pesos)	
	sembrada	cosechada				
Tancítaro	2011	19,254.00	18,990.00	139,900	7.37	\$2,766,562.80
	2010	19,254.00	18,975.00	108,688	5.73	\$1,336,644.00
	Promedio del 2010 al 2020	21,628	20,439	151,224	8.00	\$ 2,313,202.5

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2020

El Mapa 5 muestra el balance hídrico para el municipio de Tancítaro, donde se observa en color amarillo la zona clasificada como de “alerta” con un valor de precipitación entre 800 a 1,000 mm de precipitación y cubriendo la mayor superficie (56,722.61 has), esto es preocupante por colindar con la zona de “déficit” en color rojo y con una superficie de 4,395.07 has, además de limitar con los municipios de Buena Vista Tomatlán, Tepalcatepec, Apatzingán y Parácuaro.



Fuente: Elaboración propia con datos de ClimateNA V6.30 (2020).

El promedio de precipitación anual, para el municipio, ascendió a 723,916,353.75 m³ para el mismo periodo (2010-2020), de los cuales, 414,802,353.75 m³ de esta agua (57.3%), es utilizada para la producción de aguacate. Esta situación es tentativa para la explicación de déficit hídrico (Mapa 5). Es altamente probable que el déficit hídrico se relacione directamente con la producción de aguacate, dado que la planta de dicho fruto puede consumir hasta 5.2 veces más agua que la de un bosque natural (Gómez-Tagle, 2018: 19). Situación que probablemente ya tenga implicaciones ecológicas y económicas; o bien puedan ocurrir en el futuro. Actualmente ya se aprecian conflictos entre propietarios por la disposición del agua (Molina, 2019).

DISCUSIÓN

El empleo de los SIG ha sido de fundamental importancia para el cálculo de los volúmenes y áreas, así como para la detección de comportamientos en el cambio de uso de suelo de la región de estudio. Al identificar que cerca del 80% tiene un potencial de captación de agua que ha reducido, lo que se aprecia en las zonas de déficit para un período de 10 años. Es altamente probable que este déficit obedezca al cultivo de aguacate, debido a que el mismo representa un 57% del consumo de agua que capta la superficie estudiada.

Económicamente el valor de producción del aguacate alcanza un valor de \$2,313,202.47 (miles) promedio anual, lo que podría suponer un consumo de agua promedio de 309,114,000 m³. Considerando que cada metro cúbico de agua costara \$1 (un peso mexicano); al menos 13% del valor de la producción sería costo de producción de agua. En términos de gestión del agua, implicaría que por lo menos el 13.4% del valor de la producción debiese ser destinado al mantenimiento de las cuencas hidrológicas para cubrir acciones de restauración y preservación del bosque maduro. Al momento, no existen antecedentes de inversión en el mantenimiento de los bosques que permitiese conseguir y gestionar el agua en la región, exceptuando los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) que resultan raquíticos para quienes tienen poca superficie cultivada.

En otros aspectos de la producción, el rendimiento promedio de aguacate, alcanzó ocho ton/ha para el periodo analizado, (en tanto diez años antes promediaba 10 ton/ha), con una tasa promedio de crecimiento anual de producción de 3.51% lo que expone el interés por seguir expandiendo las fronteras de cultivo, y haciendo a un lado la inversión en tecnificación y conservación de las fuentes de agua para un mejor aprovechamiento no solo para las huertas sino para los usos necesarios en la región.

Es decir, el punto de vista de la producción se ha mostrado solo extractivo lo que caracterizaba a la gestión empresarial del siglo antepasado y que ahora compromete el recurso hídrico de la región, siendo este más valioso desde el enfoque de los servicios ecosistémicos por sus bienes y servicios de abasteci-

miento, regulación, soporte y cultural que pueden brindar los ecosistemas forestales. Por tal motivo, es necesario invertir adecuadamente en infraestructura e instalaciones sanitarias que monitoreen y evalúen constantemente la calidad del agua y suelo. Además de tomar medidas legales para aquellos que contaminen el agua y provoquen enfermedades intestinales y de piel ocasionada por el uso de agroquímicos.

Poca es la reinversión en mejorar las técnicas de producción de aguacate y nulo el mejoramiento en la región y sus cuencas hidrológicas. Lo que en un futuro terminará por ser no sustentable y con conflictos socio-ecológicos que han sido recurrentes en casos semejantes en los que la degradación ambiental lleva a la defensa por los recursos, pero también al conflicto por privilegiar el acceso a los mismos, (Martínez, 2008; Martínez, 2004; Martínez y Jusmet, 2015). En términos sociales, las disputas por el agua se pueden intensificar sobre todo con los municipios de menor altitud y que colindan con Tancítaro (Buena Vista Tomatlán, Tepalcatepec, Apatzingán y Parácuaro).

También se pueden plantear escenarios tales como la reducción del líquido o los desastres naturales (deslizamientos, inundaciones y socavones) producto de la degradación ambiental, por la falta de la visión integral del manejo de los recursos; en los que los desastres no son “propiamente” ambientales (Lavel, 1996; Vázquez, 2019; Cardona, 1996). De manera que el cambio de uso de suelo probablemente está empujando hacia la pérdida acelerada de las zonas de captación de agua, esta conversión podría resultar un aumento del consumo de agua y una degradación del ecosistema, perdiendo su capacidad productiva en el corto plazo.

Como complemento a los trabajos de y Lejía, et. al., 2020; Nery, et. al. 2020; Cuevas, Garrido & González, 2010; Chávez, 2009 y Cayuela, Benayas, Justel y Salas-Reyes, 2006. El presente estudio hizo uso de técnicas fundamentales para la estimación del ВН, (Alvarado, 2020). No obstante, el principal aporte se puede apreciar en la revelación de la importancia que representa el agua como insumo y como producto en la producción y exportación de aguacate. La alteración del ВН puede atribuirse directamente e indirectamente a esta actividad, dado que no solo el cambio de uso de suelo reduce las capacidades de producción de agua, sino que además hay pérdida de agua producto de la propia exportación del producto que por cada tonelada al menos 60% se compone por el vital líquido.

CONCLUSIONES

El objetivo del presente se alcanzó al estimar los efectos del cultivo de aguacate en el balance hídrico durante el periodo 2011-2019 en el municipio de Tancítaro, utilizando los SIG como herramientas de cuantificación y empleando indicadores de producción. Es de destacar algunos aspectos relevantes del presente manuscrito, como el uso de los SIG como herramientas, que permiten modelar y pronosticar los cambios en el balance hídrico, a partir de la información disponible.

Como resultado de la modelación se pudo identificar que la precipitación oscila entre 800 y 1,000 mm en 79.32% del área de estudio, para un período de diez años. Esta zona se corresponde con el uso de suelo agrícola perenne; es decir, donde están asentadas la mayor parte de las huertas de aguacate. Por lo que es imprescindible poner atención al uso, manejo y gestión del agua para estos cultivos, pues son las que consumen mayor cantidad de agua al convertir el agua en fruto.

Se aprecia que 57.3% del promedio de precipitación anual es agua utilizada para la producción de aguacate en el municipio. Lo que refiere que, si el agua tuviese un valor económico, seguramente habría sumas cuantiosas de recursos y un empleo eficiente del recurso hídrico. Esto plantea una línea de investigación para conocer el valor económico del agua como insumo, mismo que al momento no se incorpora en los costos de producción del aguacate.

Dentro de la producción de aguacate, el agua es un componente fundamental de desarrollo social y para dar continuidad y permanencia a la misma, es necesario que permanezca un flujo constante y de calidad; sin embargo, la construcción de ollas de agua es otro factor que se está abordando y que podría perturbar el ecosistema significativamente, mermando la recarga de acuíferos y contribuyendo al déficit de agua.

Sin duda, es importante abastecer las huertas para evitar su detrimento en el corto plazo, para evitar perjudicar la economía de la región, pero no justifica la forma desordenada y los mecanismos para su riego, además de la constante y creciente expansión de las mismas, que conllevan a la afectación del suelo, flora, fauna y clima entre otros componentes del ecosistema.

Por otro lado, es importante señalar la controversia del uso de los “cañones antigranizo” que suponen el desvío de la precipitación de agua en un radio de influencia de 500 metros a la redonda. Esta tecnología es utilizada principalmente para evitar la caída de las flores de las plantas de aguacate al momento de llover. La inversión en esta tecnología sugiere que los productores desean mantener altas producciones; pero sin considerar las afectaciones al ambiente y a las propias huertas de aguacate al mediano y largo plazo al evitar la recarga de mantos acuíferos de donde actualmente se extrae el agua para estos cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), 23-33.
- Alvarado Molina David Leonardo (2020) Estimación del balance hídrico de la cuenca del Rio Milagro mediante un sistema de información geográfica. Tesis como Ingeniero Agrónomo. Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias. Milagro-Ecuador.
- Bocco, G., Mendoza, M., y Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (44), 18-36.
- Bonilla-Moheno, M., Aide, T. M., Clark, M. L. (2012). The influence of socioeconomic, environmental, and demographic factors on municipality-scale land-cover change in Mexico. *Regional Environmental Change* 12: 543.
- Camacho Ponce Omar (2020) Disponibilidad hídrica actual y futura en el oriente del valle de México. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo, estado de México. Enero de 2020.
- Cayuela, L., Benayas, J.M., Justel, A., y Salas-Reyes, J. (2006). *Modelling tree diversity in a highly fragmented tropical montane landscape*. *Global Ecology and Biogeography*. 15:602-613.
- Chávez León, G., Tapia Vargas, L. M., Bravo Espinoza, M., Sáenz Reyes, J., Muñoz Flores, H. J., Vidales Fernández, I. y Mendoza Cantú, M. (2012). *Impacto de cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*.
- Cardona, O. D. (2005). Indicators of Disaster Risk and Risk Management Title: *Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgo* (No. 80377). Inter-American Development Bank.
- Cuevas, M. L., Garrido, A. Pérez, J. L., y González, D. I. (2010). *Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural*. Cotler, H., Coord. *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte IAP México, DF p, 96-103.
- CONAGUA (2018) Numeragua, México, 2018. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT.
- DOF (2009) DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de área de protección de flora y fauna, la región denominada Pico de Tancitaro. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5105970&fecha=19/08/2009
- Dunne, T. and L. B. Leopold. (1978). *Water in environmental planning*. W. H. Freeman Co. San Francisco, CA, USA.
- Escobar Jaramillo, L., y Gómez Olaya, Á. (2007). *El valor económico del agua para riego un estudio de valoración contingente*. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, (6), 16-32.

- Estrada, Carlos (2020) *El apetito voraz de aguacates*. Suplemento Informativo de La Jornada. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2020/02/15/delcampo/articulos/apetito-voraz.html>
- Esri, (2016). *Cómo funciona Spline*. Environmental Systems Research Institute, Inc. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-spline-works.htm>
- Esri (2019). *Calculadora ráster*. Environmental Systems Research Institute, Inc. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/raster-calculator.htm>
- FAO (2012) *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030*. Informe resumido. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s03.htm#c>
- Franke, R. (1982). *Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines*. Computer and Mathematics with Applications. Vol. 8. N.º 4. Pág. 273–281. Gran Bretaña.
- Fuentes Junco J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional pico de Tancítaro*. Instituto Nacional de Ecología. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas.
- Fuentes Junco. J. J. A. (2011). *Estimación del Recurso Hídrico Superficial en el Pico de Tancítaro, Michoacán: Oferta, Demanda y Escenarios de Disponibilidad*. Tesis que para obtener El Grado Académico de: Doctor En Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Posgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Gutiérrez-Contreras, M., Lara-Chávez, Ma. Blanca Nieves, Guillén- Andrade, H. y Chávez-Bárceñas, A. (2010). *Agroecología de la Franja Aguacatera en Michoacán, México*. Interciencia, septiembre 2010, Vol. 35 N° 9
- Gómez-Tagle A. (2018) *Hydrological impact of the green gold (avocado culture) in central Mexico; rainfall partition and water use comparison with native forests*. DOI: 10.13140/RG.2.2.18644.65921 Conference: Joint Conference on Forests and Water. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329060308_Hydrological_impact_of_green_gold_avocado_culture_in_central_Mexico_rainfall_partition_and_water_use_comparison_with_native_forests
- Gómez-Tagle Chávez A. (2018). *Efectos hidrológicos del cultivo del aguacate. Resumen técnico*. Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Appl. Eng. Agric. 1: 96-99.
- Harrison, P., y Pearce, F. (2000). *Atlas of Population and Environment*. University of California Press.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010, México: INEGI.
- INEGI (2014) Conjunto de datos vectoriales de información topográfica. Cartas: E13B28, E13B29, E13B38, E13B39, E13B48 y E13B49 del INEGI (2014), escala 1:50,000 serie III

- INEGI (2015). *Anuario Estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado de http://www3.inegi.org.mx/sistemas/componentes/previsualizador/vista.aspx?arch=/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076139.pdf&tipo=1
- Lavell, A. (1996). *Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano*. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. Ciudades en riesgo.
- Leija, E.G., Valenzuela-Ceballos, S.I., Valencia-Castro, M., Jiménez-González, G., Castañeda-Gaytán, G., Reyes-Hernández & H., Mendoza, M.E. (2020). *Análisis de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región centro-norte de México*. El caso de la cuenca baja del río Nazas. *Ecosistemas* 29(1): 1826. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1826>
- Martínez A.J., (2004). *Los conflictos ecológico-distributivos y los indicadores de sustentabilidad*. *Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 1, 021-30.
- Martínez, A., J. M. (2008). *Conflictos ecológicos y justicia ambiental*. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global, 103, 11-28.
- Martínez, A., J. M. y Jusmet, J. R. (2015). *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura económica.
- Martínez Nieto, L., Barranco Barranco, R., y Moreno Romero, M. V. (1992). *Extracción de aceite de aguacate: Un experimento industrial*. *Grasas y Aceites*. 43(1). 11-15 pp. Universidad de Granada.
- Martín Clemente Carlos Rodrigo, Ramírez Joaquín Sosa, Mass Moreno Manuel, Luna Ruíz José de Jesús, Meráz Jiménez Antonio de Jesús y Flores Ancira Ernesto (2015). *Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales*. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 17-26. En línea: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000100017&lng=es&tlng=es.
- Molina, A., *La Voz* (2019) Cargarán a organismos operadores de agua 'impuesto' por servicios ambientales Disponible en: <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/morelia/cargaran-a-organismos-operadores-de-agua-impuesto-por-servicios-ambientales/>
- Molina, A. (2019) *Inforural*. En Michoacán comienza la disputa por el agua; Tierra Caliente, en alerta. Disponible en: <https://www.inforural.com.mx/en-michoacan-comienza-la-disputa-por-el-agua-tierra-caliente-en-alerta/>
- Mas, Jean-François. (2106). *Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: Un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional*. Proyecto FOMIX Michoacán. Recuperado de <https://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/>
- Muñoz, C. (2007). *Pagar por los servicios hidrológicos del bosque en México*. Reconocimiento de los Servicios Ambientales, una oportunidad para la

- gestión de los recursos naturales en Colombia. Editor Sergio Camilo Ortega Pardo. ISBN 9589863418, 9789589863411
- Murat, H. (1998). *Water balance and water quality in the Curuksu basin, western Turkey*. Hydrogeology Journal, 7, 405-418
- Neris, J., Fuentes, J., Dorta, M. A., Jiménez, C., & Tejedor, M. (2020, October). *Relaciones agua-suelo-vegetación.-Influencia del cambio de uso en la tasa de infiltración de Andisoles (Tenerife, I. Canarias)*. En: Congreso Internacional sobre desertificación. <http://hdl.handle.net/10201/97802>.
- Ramos, D. A. (2015). *Cómo extraer kml en Google Earth Pro e importarlo a QGIS como shape*. Recuperado de <https://mappinggis.com/2015/05/como-extraer-kml-en-google-earth-pro-e-importarlo-a-qgis-como-shp/>
- Santillán-Fernández, Alberto, Cruz-Ramírez, Samantha Zurisadai, Calva-Castillo, Abimael, Ireta-Paredes, Arely del Rocío, & Bautista-Ortega, Jaime. (2020). *Balance hídrico climático de bosque mesófilo de montaña en la huasteca*. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 7(1), e2016. Epub 30 de mayo de 2020. <https://doi.org/10.19136/era.a7nl.2016>
- SIAP (2020) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por estado y municipio. Disponible en : http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Sokolov, A. A. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico guía internacional de investigación y métodos* (No. C 25357). Instituto de Hidrología de España, Madrid UNESCO, París (Francia).
- Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. Geogr. Rev. 38: 55-94.
- Vázquez, I. H. (2019). *Análisis ambiental de los desastres*. DELOS: Desarrollo Local Sostenible, 12(35), 5.
- Wang, T., Hamann, A. Spittlehouse, DL y Carroll, C 2016. *Datos climáticos localmente reducidos y espacialmente personalizables para periodos históricos y futuros para América del Norte*. PLOS One 11: e0156720
- WFP (2015) GRACE lanza una nueva calculadora de huella hídrica. *What's your water footprint?* Disponible en: <https://waterfootprint.org/en/about-us/news/news/grace-launches-new-water-footprint-calculator/>

ANEXO METODOLÓGICO

Tabla A1.
Estaciones virtuales periodo 2011 - 2019.

No.	POINT_X	POINT_Y	No.	POINT_X	POINT_Y
1	773714.644	2123210.92	36	769134.202	2145389.6
2	772206.516	2127179.68	37	773155.877	2147400.43
3	770063.386	2128529.06	38	779188.389	2145072.1
4	768952.134	2131386.56	39	782998.397	2145389.6
5	767126.505	2135593.45	40	784480.067	2139780.42
6	767523.381	2139244.7	41	787760.906	2134488.74
7	765142.126	2143054.71	42	790195.078	2131842.9
8	766729.63	2147579.1	43	785750.069	2130996.24
9	770857.138	2150277.85	44	779082.556	2132477.9
10	774984.646	2150277.85	45	775378.382	2135229.58
11	780144.031	2149166.6	46	773473.378	2139674.59
12	780540.907	2152817.86	47	772838.377	2144119.59
13	780382.157	2156548.49	48	778870.889	2141262.09
14	779800.072	2161311	49	784162.566	2136182.08
15	779270.905	2158003.7	50	781728.394	2135017.91
16	782892.563	2157560.46	51	777812.553	2138404.58
17	786702.571	2157031.29	52	775801.716	2142532.09
18	784903.401	2154597.12	53	781622.561	2138722.08
19	782680.896	2154808.78	54	781410.894	2142532.09
20	782892.563	2150257.94	55	776225.05	2147506.27
21	785538.402	2147929.6	56	783633.398	2147294.6
22	786279.237	2142955.43	57	785750.069	2145812.93
23	787443.406	2140415.42	58	783104.23	2132372.07
24	790089.244	2136499.58	59	777283.385	2125492.89
25	792629.249	2133747.91	60	787125.905	2128562.06
26	793264.251	2130572.9	61	784903.401	2150152.11
27	792100.082	2128562.06	62	770086.704	2148035.44
28	789136.742	2129620.4	63	768922.535	2142532.09
29	785115.068	2127292.06	64	771674.208	2137346.25

30	782363.396	2128773.73	65	774531.713	2133112.91
31	778976.722	2128773.73	66	776225.05	2129197.06
32	775166.715	2126657.06	67	778870.889	2135864.58
33	773790.878	2130890.4	68	780564.225	2146765.43
34	771145.04	2135229.58	69	783210.064	2152480.44
35	770086.704	2140309.59	70	786914.238	2137663.75

Fuente: Datos establecidos con ClimateNA V 6.30 (2020)