



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA MENEJO INTEGRADO DEL PAISAJE

Expansión aguacatera y balance hídrico en el oriente de Michoacán

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
Jairo Gabriel López Sánchez

DIRECTORA DE TESIS: **Dra. María Isabel Ramírez Ramírez**
ENTIDAD DE ADSCRIPCIÓN: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.

MORELIA, MICHOACÁN

MARZO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al posgrado en Geografía, a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) por la oportunidad brindada, así como a los profesores y personal que hicieron posible este logro.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para la realización de esta investigación.

Al proyecto PAPIIT IT300221, "Conservación ambiental y desarrollo comunitario: producción agrícola y pecuaria sustentables en comunidades rurales de reservas de la biosfera". Por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

A mi asesora la Dra. Ma. Isabel Ramírez Ramírez por su gran apoyo y acompañamiento profesional, personal y laboral a lo largo de esta etapa, así como su paciencia a lo largo de esta investigación. Mi más sincero reconocimiento y agradecimiento.

A mis síndos, Dra. Leticia Gómez, Dr. Oscar Frausto, Dr. Iván Franch y M.C. Rosaura Páez por la disposición y tiempo invertido para la revisión de este trabajo, así como por sus aportaciones y recomendaciones al mismo.

Al grupo de trabajo "Paisaje y Territorio en Áreas Protegidas" por su orientación y recomendaciones en los avances de este proyecto.

A mi familia, que impulsa mis andares
Mis hijas que han ido crecido casi a la par de este proyecto

A mi compañera de vida por su amor día a día y comprensión,
gracias infinitas

RESUMEN

La demanda de cultivos altamente rentables ha aumentado considerablemente a nivel global, provocando cambios de cubierta y usos de suelo (CCUS), así como una intensificación en las áreas agrícolas existentes. Estos cambios pueden ocasionar diversos efectos adversos en el ambiente, entre ellos un impacto en el balance hídrico a nivel de cuenca.

En México, entre 1976 y 2000 se han deforestado más de dos millones de hectáreas para aumentar la frontera agrícola, siendo actualmente uno de los principales países exportadores a nivel global de diversos productos agrícolas como: tomates, chiles, frutos rojos y aguacate. Para el caso particular de Michoacán, desde las primeras décadas del siglo XXI, los principales CCUS han ocurrido en los bosques de pino y pino-encino, que coinciden en requerimientos edáficos y climáticos con cultivos de creciente demanda internacional como el aguacate. Si bien, las plantaciones de aguacate se concentraban principalmente en el centro del estado, en los últimos años se han ido expandiendo hacia latitudes y elevaciones mayores, convirtiendo al oriente del estado en un área de importancia para este cultivo. Esto genera una presión más sobre los bosques de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) y sus alrededores.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de la expansión e intensificación del cultivo de aguacate en las últimas dos décadas sobre el balance hídrico en las microcuencas pertenecientes a la zona aguacatera del oriente de Michoacán. Para cumplir este objetivo, se identificaron visualmente a una escala 1:5,000 los cambios de cubierta y uso del suelo asociados al cultivo del aguacate, obteniendo la franja aguacatera del oriente del estado, para posteriormente delimitar las microcuencas asociadas a esta, sobre las cuales se calculó el balance hídrico climático de acuerdo con el modelo de balance hídrico de Thornthwaite y Matter de 1955, posteriormente, se reclasificaron las huertas de aguacate según su etapa de desarrollo y se estimaron los requerimientos hídricos del aguacate según la literatura, finalmente, se comparó el balance hídrico calculado contra las requerimientos hídricos del aguacate con base en su etapa de desarrollo para cada una de las microcuencas. Los resultados muestran que el cultivo paso de 2,030 hectáreas en 2005 a 9,626 en 2020, distribuyéndose en 10 microcuencas en la primera fecha y en 13 en la segunda. Las 13 microcuencas suman un total de 134, 429 hectáreas, donde el aguacate se ha expandido a una tasa promedio anual del 10 %. La mayor parte de esa transformación (50%) ha sido sobre parcelas agrícolas de temporal y de riego, y en menor medida sobre bosques abiertos (8%) y densos (9%). De acuerdo con estos resultados, el 72% de las huertas de aguacate corresponde a huertas desarrolladas y el 28% corresponde a huertas jóvenes o medianamente desarrolladas. Así mismo, se obtuvo que las plantaciones de aguacate dentro de las 13 microcuencas analizadas representan una demanda hídrica de 158,156 m³/día. Además, se

identificaron dos microcuencas con un déficit hídrico elevado. Esta investigación aporta información que puede contribuir a los diversos planes de manejo territorial (municipales, comunitarios, de cuenca o del área protegida) de la región, ya que muestra como se ha expandido el cultivo del aguacate en el Oriente de Michoacán con mayor precisión que las estadísticas oficiales. Por otra parte, proporciona una idea del riesgo que representa la expansión del cultivo del aguacate para el balance hídrico en las microcuencas de la región.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MÉTODOS	11
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	11
2.2. EXPANSIÓN DEL CULTIVO DE AGUACATE 2005- 2020	12
2.2.3 DETECCIÓN Y TASAS DE CAMBIO DE CUBIERTA Y USO DEL SUELO 2005-2020	17
2.3 DELIMITACIÓN DE MICROCUENCAS	18
2.4 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO	19
2.4.1 NORMALIZACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS.....	21
2.4.2 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL Y ANUAL (TMM Y TMA)	22
2.4.3 PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL Y ANUAL (PAM Y PAA)	23
2.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)	23
2.4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)	24
2.4.5.1 CÁLCULO DE ETR	25
2.4.6 DÉFICT Y SUPERÁVIT HIDRICO.....	26
2.5 ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA EXPANSIÓN AGUACATERA SOBRE EL BALANCE HÍDRICO EN LAS MICROCUENCAS.....	26
2.5.1 CLASIFICACIÓN DE HUERTAS DE ACUERDO CON SU ETAPA DE DESARROLLO	26
2.5.2 REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DEL AGUACATE	28
3. RESULTADOS.....	29
3.1 EXTENSIÓN DE PLANTACIONES DE AGUACATE EN EL ORIENTE DE MICHOACÁN Y SUS MICROCUENCAS.....	29
3. 1. 1 CAMBIOS EN LA CUBIERTA Y USO DE SUELO 2005-2020	30
3.2 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO POR MICROCUENCA.....	31
3.3 EFECTO DE LA EXPANSIÓN AGUACATERA SOBRE EL BALANCE HÍDRICO EN LAS MICROCUENCAS	36
3.3.1 CLASIFICACIÓN DE HUERTAS POR EDAD Y DEMANDA HÍDRICA	36
3.3.2 BALANCE HÍDRICO Y DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO DE AGUACATE	39
4. DISCUSIÓN	41
5. CONCLUSIONES.....	44
6. REFERENCIAS	46
ANEXOS	59

ÍNDICE DE FIGURAS Y CUADROS

FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	9
Figura 2. Ejemplo de interpretación visual y digitalización manual de huertas de aguacate escala visual 1:5,000 (2005 y 2020)	11
Figura 3. Imágenes de satélite provenientes de la plataforma Google Earth Pro	12
Figura 4. Mosaico de imágenes de muy alta resolución obtenidas de Google Earth Pro para los años 2005 y 2020 del área de estudio	13
Figura 5. Sobreposición de polígonos 2020 sobre imagen 2005 (aun sin interpretación) (A) y delimitación de cubiertas y usos del suelo en imagen 2005 (polígonos en verde identificados como huertas de aguacate) (b) .	14
Figura 6. Esquema del proceso automático para la delimitación de microcuencas con la herramienta “hidrología” disponibles en el programa Qgis 3.10	16
Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo del balance hídrico por microcuena y el periodo de datos obtenido	18
Figura 8. Estaciones climatológicas y años de registros	19
Figura 9. Clasificación visual de huertas de aguacate 2020 según su etapa de desarrollo	26
Figura 10. Construcción de la base de datos sobre los requerimientos hídricos del cultivo del aguacate.	27
Figura 11. Mapa de huertas de aguacate 2005- 2020 y sus microcuencas correspondientes	29
Figura 12. Temperatura media anual	32
Figura 13. Precipitación anual acumulada	33
Figura 14. Evapotranspiración potencial corregida anual	33
Figura 15. Evapotranspiración real anual	34
Figura 16. Déficit hídrico anual	34
Figura 17. Superávit hídrico anual	35
Figura 18. Balance hídrico microcuena Senguio	35
Figura 17. Blance hídrico microcuena Aputzio de Juárez.....	36

CUADROS

Cuadro 1. Comparación espacial para la identificación de cambios de cubierta y uso de suelo a huertas de aguacate para el periodo 2005 – 2020	15
Cuadro 2. Superficie de huertas de aguacate 2005 y 2020 por microcuenca	28
Cuadro 3. Cambio de cubiertas del suelo por expansión aguacatera (2005-2020)	30
Cuadro 4. Cambio de cubiertas del suelo por expansión aguacatera RBMM (2005-2020)	31
Cuadro 5. Temperatura media anual, precipitación anual acumulada y evapotranspiración potencial en microcuencas asociadas a huertas de aguacate en el oriente de Michoacán	32
Cuadro 6. Clasificación visual de huertas de aguacate de acuerdo a su etapa de desarrollo en el año 2020.....	36
Cuadro 7. Demanda hídrica del cultivo de aguacate	36
Cuadro 8. Demanda hídrica del cultivo del aguacate necesaria para el crecimiento de la planta y el riego necesario para la producción	38
Cuadro 9. Déficit y superávit hídrico por microcuenca versus la demanda hídrica del cultivo del aguacate necesaria para el crecimiento de la planta y el riego necesario para la producción de la fruta (bajo un esquema de producción).....	40

SIGLAS, ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

ANP	Área Natural Protegida
BHC	Balance Hídrico Climático
CCUS	Cambio de Cubierta Uso del Suelo
CEDRESSA	Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria
CIGA	Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
D	Déficit hídrico
ETP	Evapotranspiración potencial
ETPM	Evapotranspiración potencial mensual
ETR	Evapotranspiración real
ETRM	Evapotranspiración real mensual
FAO	Food and Agriculture Organization
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
IDW	Inverse Distance Weighting
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
L	Litros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
Mm	Milímetros
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PAA	Precipitación acumulada anual
PAM	Precipitación acumulada mensual
PMM	Promedio de precipitación acumulada mensual
PP	Precipitación
RBMM	Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca
Ru	Reserva útil
S	Superávit hídrico
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TMA	Temperatura media anual
Tmax	Temperatura Máxima
Tmin	Temperatura Mínima
TMM	Promedio de temperatura media mensual
UN	United Nations
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VR	Variación de reserva
VRM	Variación de reserva mensual
WWAP	World Water Assessment Programme

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una fuerte presión hacia los recursos hídricos a nivel mundial, convirtiendo la escasez de agua en uno de los principales desafíos para el desarrollo de las sociedades, ya que la seguridad alimentaria y nutricional dependen de este recurso (FAO, 2016). Dentro de las mayores presiones para los recursos de agua dulce se encuentra el sector agrícola, representando alrededor de tres cuartos de las extracciones en el mundo y en algunos países sobrepasando más del 90% (WWAP, 2012; WWAP, 2019; UN, 2021). Se estima que para el año 2050, cinco billones de personas vivirán en áreas con estrés hídrico (*i.e.* cuando la demanda de agua supera la cantidad disponible por diferentes factores en un tiempo determinado; Koncagül, E., 2015, al menos un mes al año; Burek et al., 2016) y más del 50% de la demanda de agua será para uso agrícola y 24% para uso doméstico e industrial (FAO, 2016).

Aunado a esto, en las últimas dos décadas, la demanda de cultivos altamente rentables ha aumentado considerablemente a nivel global, trayendo consigo una intensificación y expansión agrícola y una mayor demanda de agua (FAO, 2021). Por ejemplo, en Estados Unidos de América ha aumentado considerablemente la producción de maíz, en la Unión Europea la siembra de trigo y canola, en África subsahariana, Asia meridional y sudoriental la palma africana y en Sudamérica la soya. Además, varios países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), así como Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica (BRICS) han comprado o rentado grandes áreas agrícolas en África, Asia y América Latina para asegurar sus necesidades de combustible y alimentos, ocasionando cambios de cubierta y uso de suelo, así como cambios en la distribución del agua y aumento de los requerimientos hídricos por cultivo, ocasionado principalmente, por la sustitución de cultivos tradicionales a cultivos con un sistema de producción intensivo (WWAP, 2012, FAO, 2021, UNESCO, 2023). Así mismo, en 2019 se registró que en algunos países al sur de Asia, África y América Latina utilizan más del 80% de las extracciones de agua para uso agrícola (Our World in Data, 2019).

México se encuentra entre los países con estrés hídrico más severo, principalmente debido a alteraciones por una inadecuada gestión del agua (Koncagül, E., 2015). Se estima que el 76%

del recurso hídrico es destinado a la agricultura, 14.4% abastecimiento público, 4.7% energía eléctrica y 4.9% industria autoabastecida (Conagua, 2018).

Actualmente, mediante el uso de técnicas de percepción remota e imágenes de satélites se ha podido generar información detallada tanto espacial como temporal sobre las dinámicas de cambios de cubiertas y usos del suelo (CCUS¹) en diferentes partes del mundo (Lu et al, 2004; Lu & Weng, 2007; Gao et al., 2016; Mas et al., 2017; Andualem et al, 2018).

Para el caso del país, el uso de suelo agrícola ha aumentado considerablemente, ya que en el periodo de 1976 a 2000 se deforestaron más de dos millones de hectáreas para aumentar la extensión de la frontera agrícola (Mas et al., 2004, FAO, 2021). En Michoacán, entre 2004 y 2017 los principales CCUS fueron identificados en los bosques de pino y pino-encino (Mas et al., 2017). Arima y colaboradores (2022) estimaron una pérdida del 7% en estos bosques dentro de la franja aguacatera y del 4% en todo el estado de Michoacán para el año 2050. Debido a que estos bosques se desarrollan bajo condiciones edáficas y climáticas que coinciden con los requerimientos agroclimáticos óptimos con el cultivo del aguacate (Chávez-León et al., 2012, Arima et al., 2022). Esto ha favorecido una constante expansión que ha dado lugar a un incremento de 13,000 hectáreas en 1974 a 153,000 hectáreas en 2011 (Morales y Cuevas 2012).

¹ Para poder definir el concepto de CCUS primero abordaremos el concepto de cubierta y uso de suelo, ya que en algunas ocasiones puede llegar a confundirse o mezclarse indiscriminadamente; *Cubierta del suelo* (*Land cover* por sus siglas en inglés) se define como las características biológicas y físicas de la superficie terrestre (Mayer y Turner, 1992; Loveland y DeFries, 2004, *i.e.* elementos como bosques, áreas urbanas, cuerpos de agua, suelos desnudos, pastizales, etc.) mientras que *Uso del suelo* (*Land use* por sus siglas en inglés) se define a la manera en que los seres humanos utilizan y gestionan la tierra (Mayer y Turner, 1992; Loveland y DeFries, 2004, *i.e.* silvicultura, agricultura, conservación, etc.), de esta manera, CCUS se define como la conversión o modificación de la cubierta del suelo (cambio de cubierta) y el cambio en el uso o manejo de la tierra por el humano (cambio de uso de suelo) Mayer y Turner ,1994.

Esta expansión ha estado motivada por la creciente demanda internacional y la alta rentabilidad del cultivo frente a otros productos agrícolas y forestales (Chávez-León et al., 2012, Borrego y Carlón, 2021; Cho et al., 2021; Denvir et al., 2022; Olivares-Martínez et al., 2023). Así, el aguacate se ha convertido en el producto agrícola de mayor valor económico para el estado, siendo el principal productor a nivel nacional y el segundo producto con la mayor tasa de exportación, solo después de la cerveza y seguido del tomate (SADER, 2020). En un periodo de 20 años las exportaciones aumentaron más de 500 por ciento, hacia países como Estados Unidos de América y Canadá, convirtiéndose en una de las principales fuentes de divisas para el estado (CEDRSSA, 2017).

Sin embargo, el modelo de producción que sigue este cultivo es de alto impacto para el ambiente, no solo por los CCUS, sino también por el elevado uso de agroquímicos, pérdida de biodiversidad, cambios en la cultura agrícola de la región (sustitución de cultivos tradicionales por aguacate) y efectos negativos en el sistema hidrológico dentro del territorio, nivel de cuencas o en cualquiera de sus subdivisiones (Bravo et al., 2009; Chávez-León et al., 2012; Sánchez, 2018). En comparación con otras cubiertas o usos del suelo, estas plantaciones requieren de grandes cantidades de agua para lograr un alto rendimiento (Bravo et al., 2009; Gómez-Tagle et al., 2022). Por ejemplo, los bosques templados del estado captan alrededor de 18 veces más agua y consumen aproximadamente 63% menos agua que el aguacate, lo que equivaldría a que un árbol de pino de 12 m de altura puede consumir entre 9 y 22 L/día y un árbol de aguacate de 6m de altura puede consumir entre 62 y 103 L/día (Gómez-Tagle et al., 2018; Gómez-Tagle et al., 2019).

Actualmente, la producción de aguacate en Michoacán se concentra en 65 de los 113 municipios del estado (SIAP 2020a), siendo los municipios del oriente los más recientes en incorporarse a la región conocida como la franja aguacatera. De acuerdo con simulaciones de distribución de la vegetación y escenarios del clima definidos a partir de los Modelos de Circulación General, se observa un desplazamiento de las fronteras del cultivo de aguacate hacia latitudes y elevaciones mayores (Chávez-León et al., 2012; Charre-Medellín et al., 2021; Arima et al., 2022), lo que ha convertido a los municipios del oriente del estado en una zona de gran importancia para el cultivo.

Existen numerosos trabajos de CCUS realizados en el oriente del estado; sin embargo, la gran mayoría de ellos se han centrado en los cambios de la cubierta forestal (Ramírez et al., 2006, 2015, 2019; Honey-Rosés et al., 2011; Navarrete et al., 2011; Champo-Jiménez et al., 2012; Vidal et al., 2014; Brower et al., 2016; Ramírez et al., 2019) y no permiten diferenciar la superficie de las plantaciones de aguacate. No obstante, estos estudios han servido como base para desarrollar otros trabajos, en los que se ha identificado, por ejemplo, la relación del uso del suelo con la calidad del agua (Merlo-Reyes, 2018), con la recuperación forestal (Honey-Rosés et al. 2011), y con la efectividad de la conservación de zonas críticas para la invernación de la mariposa monarca (Saunders et al. 2019).

En trabajos recientes, se ha mostrado como la expansión del aguacate está siendo una presión más para los bosques del oriente de Michoacán y la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Por su parte, Hernández y Ramírez (en prensa) muestran cómo en el municipio de Zitácuaro por un proceso de intensificación agrícola, el aguacate con 7,397 hectáreas, se ha convertido en el cultivo de mayor extensión, por encima incluso del maíz. Estos autores también calcularon que el 14% de esas plantaciones se ubican en zonas que no tienen la aptitud climática adecuada, 29% están en zonas moderadamente aptas y 57% en zonas aptas.

De esta manera, es necesario generar información detallada sobre los CCUS que permitan comprender las dinámicas actuales y futuras asociadas a la expansión agrícola, pérdida de biodiversidad, influencia en el cambio climático e hidrológico (Herold et al., 2009; Radoux et al., 2014; Radoux y Bogaert, 2014), sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y metodológicos, no es una tarea fácil de lograr (Radoux, J y Defourny, P, 2010).

Es por ello, que a pesar de las virtudes de los métodos de clasificación automáticas o semi automáticas para la detección de CCUS, la interpretación visual de imágenes de satélite sigue siendo una técnica que proporciona una fiabilidad mayor de la información respecto a las demás, ya que en ella el productor puede incluir diferentes criterios como; conocimiento previo del área de estudio, patrones y textura de la vegetación, contexto y proximidad de cubiertas y usos del suelo, entre otros (Sader et al., 1990; Palacio Prieto y González, 1994; Mas y Ramirez, 1996; Van Den Broek, Smith, & Toet, 2004; Ruelland et al., 2011; Zhou et al., 2014).

Que, al combinarlo con la estimación del balance hídrico² a nivel de cuenca, no solo como una unidad de estudio, permite destacar la importancia de las interconexiones que se dan entre sus elementos y la influencia de las actividades humanas con la disponibilidad hídrica. En donde se entiende a la cuenca como una unidad territorial de gestión del recurso hídrico, en el que las decisiones que se tomen afectan o benefician al sistema en general (Dourojeanni et al., 2002; Burgos y Bocco, 2015).

Por todo lo anterior, el objetivo general del presente trabajo es: evaluar el efecto de la expansión del cultivo de aguacate, en las últimas dos décadas, sobre el balance hídrico en las microcuencas de la zona aguacatera del oriente de Michoacán. Para ello, como objetivos específicos se plantearon:

1. Analizar los cambios de cubierta y uso de suelo por expansión del cultivo de aguacate en las últimas dos décadas en la franja aguacatera del oriente de Michoacán.
2. Identificar y delimitar las microcuencas que corresponden a la franja aguacatera del oriente de Michoacán y calcular el balance hídrico superficial de cada una.
3. Estimar el efecto de la expansión aguacatera sobre el balance hídrico en las microcuencas del oriente de Michoacán.

²Es un concepto fundamental en hidrología, ya que hace referencia a la cantidad de agua que entra y sale de un sistema hidrológico durante un periodo de tiempo específico que puede calcularse a diferentes escalas, con él, se puede estimar cuantitativamente los cambios en el almacenamiento del agua (Thornthwaite y Mather, 1995; Oki, y Kanae, 2006; Gupta, 2008; Thomas y Goudie, 2009)

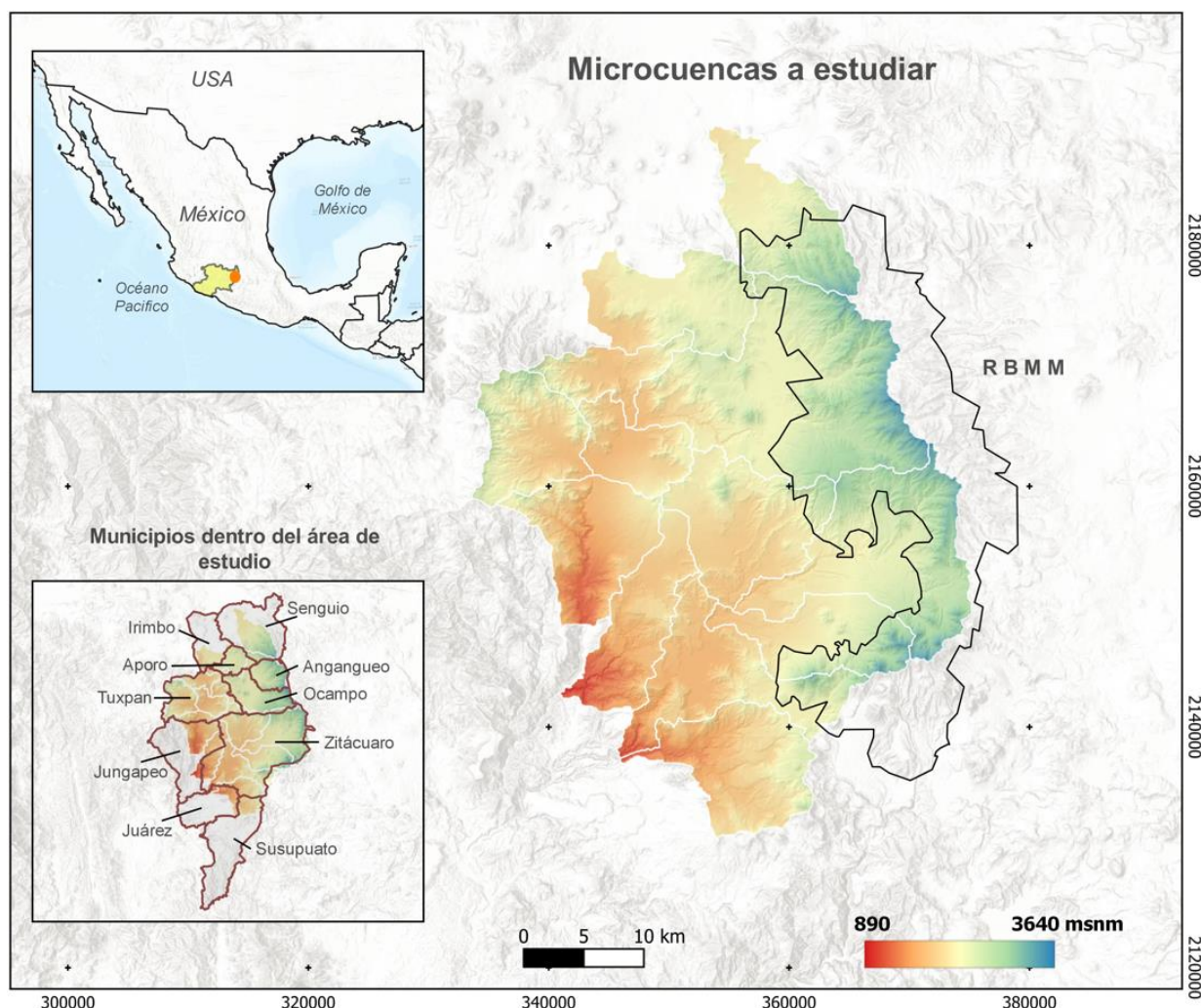
2. MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Las microcuencas a estudiar se encuentran en la parte oriente del estado de Michoacán, entre las coordenadas 19° 48' y 19° 15' latitud norte y 100° 23' y 100° 21' de longitud oeste (Figura 1). Abarcan un total de 10 municipios, cinco casi en su totalidad: Angangueo, Aporo, Tuxpan, Zitácuaro y Ocampo; y cinco en una proporción menor: Irimbo, Juárez, Jungapeo, Senguio y Susupuato. El área comprende la porción michoacana de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) (CONANP, 2000) y contribuye a la captación pluvial y recarga hídrica de la subcuenca del Cutzamala, Región Hidrológica Balsas y la subcuenca Lerma-Toluca, Región Hidrológica Lerma-Santiago (Conagua, 2001).

El área forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal y de la Sierra Madre del Sur, compuesta por un conjunto de sierras y lomeríos que van desde los 900 a 3600 msnm (Figura 1). En esta parte del estado la vegetación y usos del suelo predominantes son: bosques de pino-encino, agricultura de temporal y de riego, bosque de oyamel, vegetación arbustiva y pastizal inducido (INEGI, 2016). Los climas presentes son: semifrío subhúmedo, templado subhúmedo, semicálido y cálido subhúmedo (García, 1998). Los suelos más importantes son Andosol, Luvisol, Vertisol, Regosol y Acrisol (INEGI, 2014a).

Figura 1. Localización del área de estudio



2.2. EXPANSIÓN DEL CULTIVO DE AGUACATE 2005- 2020

Para analizar los cambios en la cubierta y el uso de suelo por expansión del cultivo de aguacate, se llevó a cabo la interpretación visual y digitalización manual a una escala visual de 1:5,000 de las huertas de aguacate presentes en el oriente del estado para un periodo de 15 años (2005 - 2020) (Figura 2). Se utilizó el método de fotointerpretación interdependiente propuesto por la FAO (1996), el cual asegura un alto nivel de consistencia temática y espacial entre las diferentes fechas analizadas. Este método consiste en interpretar un año en específico, creando los polígonos correspondientes y utilizarlos para interpretar la segunda fecha, modificando únicamente aquellos polígonos en los que se identifique algún cambio. Además, el método permite contrastar constantemente entre fechas, ya que cada una depende de la otra, reduciendo la generación de errores de clasificación. También permite al

interprete un control sobre ambas fechas en el que se puede discernir si se trata de cambios verdaderos o falsos, cambios por confusión espectral de las cubiertas del suelo. Así mismo, se reducen errores de posición, en donde el interprete puede identificar los posibles desplazamientos entre imágenes y no señalarlos como cambios verdaderos (FAO, 1996; Ramírez y Zubieta, 2005; Mas et al., 2017).

Figura 2. Ejemplo de interpretación visual y digitalización manual de huertas de aguacate escala visual 1:5,000 (2005 y 2020)



Este proceso se realizó utilizando imágenes de muy alta resolución obtenidas de la plataforma de Google Earth Pro para los años 2005 y 2020 (Figura 3), destacando que algunas imágenes de la plataforma se encontraban solo para el año 2019 (últimos meses del año) o 2021 (primeros meses del año). El mismo caso ocurre para lo que consideramos como el año 2005, en donde se encontraron imágenes que van desde el año 2004 a 2006. Se generaron un total de 112 escenas, las cuales se descargaron a una escala gráfica de 700 m y se georreferenciaron en el SIG Qgis, obteniendo un mosaico de imágenes para los años 2005 y 2020 con una resolución espacial menor a un metro por pixel (Figura 4).

Figura 3. Imágenes de satélite provenientes de la plataforma Google Earth Pro. (izquierda 13 de marzo de 2006 y derecha 18 de enero de 2021)



Figura 4. Mosaico de imágenes de muy alta resolución obtenidas de Google Earth Pro para los años 2005 y 2020 del área de estudio.



Una vez digitalizadas las plantaciones de aguacate 2005 y 2020, se llevó a cabo una fotointerpretación de cambios de cubierta y uso del suelo. Este proceso consistió en superponer los polígonos identificados como huertas de aguacate del año 2020 sobre las imágenes de satélite del año 2005 e identificar el uso y cubierta del suelo presente en ese año (omitiendo los polígonos previamente identificados como huertas de aguacate en el año 2005, los cuales solo se agregaron de manera directa a la nueva capa). Con esto se identificaron seis categorías más de cubiertas y usos del suelo, que también se delimitaron con base en sus patrones en la estructura, tonalidad, textura y contexto de las diferentes áreas (Ruelland et al., 2011; Zhou et al., 2014). Con ello se generaron los mapas de

plantaciones de aguacate y los cambios de cubierta uso del suelo para los años 2005 y 2020, en formato digital a escala 1:5,000, con las siguientes categorías: 1) plantaciones de aguacate, 2) agricultura de temporal, 3) agricultura de riego, 4) pastizal, 5) arbustos, 6) bosque cerrado y 7) bosque abierto. Es importante mencionar que los polígonos de 2020 fueron divididos de acuerdo con las cubiertas y usos del suelo que presentaban en 2005. Es decir, si un polígono clasificado como huerta de aguacate en 2020 presentaba tres cubiertas y usos del suelo en 2005, este se dividió en tres para poder asignar a cada polígono su categoría correspondiente de acuerdo con la interpretación visual que se realizó (Figura 5).

Figura 5. Sobreposición de polígonos 2020 sobre imagen 2005 (aun sin interpretación) (A) y delimitación de cubiertas y usos del suelo en imagen 2005 (polígonos en verde identificados como huertas de aguacate) (b).



2.2.3 DETECCIÓN Y TASAS DE CAMBIO DE CUBIERTA Y USO DEL SUELO 2005-2020

Una vez obtenidos los mapas de cubiertas y uso del suelo 2005 y 2020, se llevó a cabo una comparación espacial de mapas para las dos fechas empleando el SIG Qgis 3.10 y siguiendo lo propuesto por Pontius et al. (2004).

La sobreposición de mapas temáticos de dos fechas (tiempo 1 (2005) y t tiempo 2 (2020)) permitió ubicar los cambios de cobertura del suelo. Su comparación permite calcular la superficie total para cada categoría y localizar los cambios espacialmente, obteniendo una matriz de transición o matriz cruzada, donde en el año 2020 se tienen las huertas de aguacate y en 2005 se obtienen las categorías que pasaron a ser huertas durante este periodo de tiempo analizado (Cuadro. 1).

	Tiempo 2				Total, tiempo 1 (Pj+)	Pérdidas
	Categoría 1(j)	Categoría 2	Categoría 3	Categoría j		
Tiempo 1 Categoría 1 (i)	P 11	P 12	P 13	P 1j	P 1 +	P 1 + - P 11
Categoría 2	P 21	P 22	P 23	P 2j	P 2 +	P 2 + - P 22
Categoría 3	P 31	P 32	P 33	P 3j	P 3 +	P 3 + - P 33
Categoría i	P i1	P i2	P i3	P ij	P 4 +	P 4 + - P 44

Cuadro 1. Matriz de transición para dos tiempos con pérdidas y ganancias. Elaborada a partir de Pontius et al. (2004).

Así mismo, se obtuvo la tasa de cambio a través de la formula propuesta por la FAO (1996):

$$(1) \quad t = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:

t = tasa de cambio

S_1 = superficie mapa 1

S_2 = superficie mapa 2

n = número de años entre las dos fechas

2.3 DELIMITACIÓN DE MICROCUENCAS

Para la delimitación de las microcuencas se utilizó el proceso automático de la herramienta “r.watershed” de GRASS disponible en el SIG Qgis 3.10 (Figura 6). Para la aplicación de esta herramienta se requiere un modelo digital de elevaciones (MDE), el cual se obtuvo a través de la interpolación de curvas de nivel cada 20m disponibles de los datos vectoriales de las cartas topográficas del INEGI escala 1:50,000 para la zona de estudio (INEGI, 2014). Este MDE fue corregido con base en la herramienta “fill sink” para eliminar cualquier depresión dentro del modelo y que no afectara el posterior modelado de los flujos de escorrentía. Una vez corregido el MDE, se obtuvieron datos de altitud, acumulación de flujo, dirección de flujo, y se asignó el tamaño de las microcuencas que deseamos obtener. El tamaño de las microcuencas se determinó con base en la extensión promedio de las microcuencas delimitadas en la zona por el Fideicomiso de Riesgos Compartido (FIRCO, 2007) el cual es de 7,200 ha. Además, se seleccionaron solo aquellas microcuencas que cumplieran las siguientes condiciones: 1) microcuencas dentro de la RBMM con presencia de cultivo de aguacate 2) microcuencas fuera de la RBMM con presencia de 50 ha o más de cultivo de aguacate, una vez seleccionados estos parámetros se procedió a vectorizar el resultado.



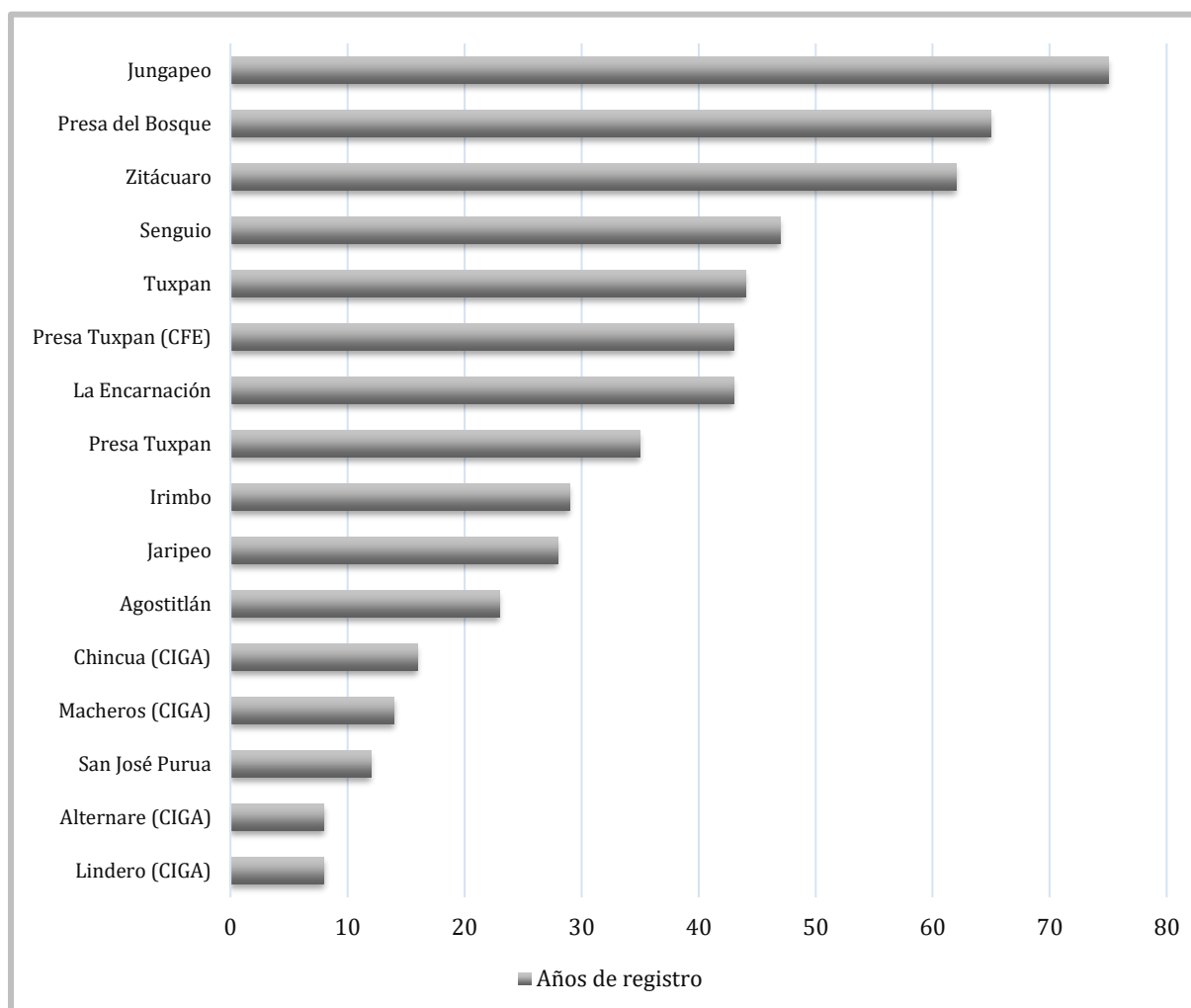
Figura 6. Esquema del proceso automático para la delimitación de microcuencas con la herramienta “hidrología” disponibles en el programa Qgis 3.10

2.4 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO

Para calcular el balance hídrico climático (BHC) de las diferentes microcuencas se utilizó el modelo de balance hídrico de Thornthwaite y Mather (1955). Este se basa en estimar la evapotranspiración en función de la temperatura, latitud de la zona de estudio y mes para la obtención de horas sol por día (evapotranspiración corregida en función de la latitud; Martín et al., 2015). Este es uno de los métodos más utilizados, ya que no requiere de mediciones directas en campo y considera el diferencial entre la precipitación y evapotranspiración como la disponibilidad hídrica (Martín et al., 2015). Además, al combinarlo con un sistema de información geográfica (SIG), cada pixel se trata como un balance hídrico individual (Mendoza et al., 2002), lo que permite obtener el balance hídrico del total de la cuenca.

Para la estimación del balance hídrico climático mensual se consideró a la precipitación como la única entrada de agua al sistema y la evapotranspiración potencial y real como la salida de cada una de las microcuencas, en la que se definió una capacidad de campo de 100 mm siguiendo lo determinado por Ramírez (2001). Para ello, se identificaron y descargaron los datos climáticos de 19 estaciones meteorológicas: 15 pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2020) y 4 del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM). Sin embargo, se encontraron algunas inconsistencias en los datos registrados de algunas estaciones, por lo que se optó por utilizar 16 estaciones: 12 del SMN y 4 del CIGA (Figuras 7 y 8). Se buscó que las estaciones estuvieran distribuidas homogéneamente en el área de estudio y se contara con el mayor número de años de registro, el registro promedio de las estaciones utilizadas fue de 23 años, los años de registro datan de 1921 hasta la fecha, variando el periodo de años con registro, ya que algunas estaciones se encuentran suspendidas desde la década de 1980.

Figura 8. Estaciones climatológicas y años de registros



2.4.1 NORMALIZACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

Las estaciones del SMN presentan registros diarios de precipitación (PP) y temperatura máxima y mínima (Tmin, Tmax), mientras que las estaciones del CIGA presentan datos horarios de PP, Tmin y Tmax. Por lo que, los valores promedio de precipitación acumulada mensual (PMM) y temperatura media mensual (TMM) se obtuvieron con base al periodo de años de registro de cada estación climatológica. (Farawey, 2006; Gómez y Medina, 2012; Hernández Aguilar, 2018). Creando una misma estructura para las diferentes series de datos obtenidas, así como la eliminación de datos repetidos.

A partir de estos datos, se obtuvieron los mapas de los promedios de precipitación acumulada mensual y anual, así como los mapas de temperatura media mensual y anual para cada una

de las microcuencas. A continuación, se describe el procedimiento para la obtención de los mapas antes mencionados.

2.4.2 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL Y ANUAL (TMM Y TMA)

Una vez obtenida la base de datos con la temperatura media mensual y anual, se creó base de datos en formato CSV que contiene: nombre de la estación, latitud, longitud, altitud, temperatura media por mes y anual. Esta base de datos se ingresó al software R studio en el que se llevó a cabo el cálculo de la temperatura considerando el gradiente altitudinal (Fries et al. 2012) mediante la fórmula:

$$(2) T_{det} = T_{mensual} + (r(Z_{det} - Z_{estacion}))$$

Donde:

T_{det} = temperatura determinada

$T_{mensual}$ = temperatura media mensual

r = gradiente altitudinal (correlación entre la latitud y la temperatura mensual)

Z_{det} = altitud determinada (en nuestro caso se empleó 1,000 msnm)

$Z_{estación}$ = altitud de cada estación (msnm)

Una vez obtenida la base de datos con la T_{det} se llevó a cabo la interpolación mediante ponderación de la distancia inversa (IDW) del paquete "Gstat" en el programa R studio (www.r-project.org), del cual se obtuvieron 13 mapas en formato raster. Posteriormente, a estos mapas se les aplicó la fórmula: $3) T_{xy} = T_{det} + (r(Z_{MDExy} - Z_{det}))$ en el que se incorpora los valores del MDE (15 m por pixel) (Z_{MDExy}) y de la correlación entre la latitud y la temperatura (r), para así obtener los mapas de temperatura media mensual y anual considerando el gradiente altitudinal del área de estudio.

2.4.3 PRECIPITACIÓN ACUMULADA MENSUAL Y ANUAL (PAM Y PAA)

Una vez obtenida la base de datos con los promedios de precipitación acumulada mensual y anual, se creó un archivo de tipo punto con la siguiente información: nombre de la estación, latitud, longitud, promedios de precipitación acumulada por mes y anual. Este archivo se utilizó para llevar a cabo una interpolación “Spline” (Ikechukwu et al., 2017; Hernandez Aguilar, 2018; Ruíz-Sevilla y Ortiz-Paniagua, 2021) en el Software ArcMap. Este tipo de interpolación fue el más adecuado para obtener los mapas de precipitación acumulada mensual y anual para el BHC, debido a que existe una baja correlación entre la altitud y la distribución de la precipitación.

2.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

Para el cálculo de los mapas de ETP mensual y anual se aplicó el método propuesto por Thornthwaite y Mather (1955) (aplicado en Ramírez 2001; Martín et al., 2015; Sevilla y Paniagua, 2021) el cual se basa en determinar la evapotranspiración en función de la temperatura, latitud y mes de la zona de estudio. De esta manera, se utilizaron los valores del mapa de temperatura mensual y anual para estimar el mapa de evapotranspiración potencial (ETP) mensual y anual a través de las fórmulas 3, 4, 5 y 6. Estas fórmulas se implementaron en el software R Studio, obteniendo, un mapa del índice α (*ajuste de la relación entre la temperatura y la evapotranspiración, aumentando la precisión de su estimación*), 13 mapas de índice de calor, 13 de evapotranspiración sin corregir, 13 de evapotranspiración corregida en función de la latitud y horas sol por día (ETP), todos en formato ráster para cada una de las microcuencas.

Formula general:
$$ETP = 1.6 \left[\frac{10T^a}{I} \right] I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{aj}}{5} \right]^{1.5}$$

(3) Determinar el índice de calor mensual $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$ a partir de la temperatura media mensual (t)

(4) Índice de calor anual $I = \sum i$

(5) Determinar la ET mensual “sin corregir” $ETP_{\text{sin corrección}} = 16 \left(10 * \frac{t}{I} \right)^a$

$$a = 0.000000675 \times I^3 - 0.0000771 \times I^2 + 0.01792 \times I + 0.49239$$

Donde:

ET mensual sin corrección: Evapotranspiración potencial a nivel mensual en mm/mes, para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).

t: Temperatura media mensual °C.

I: Índice de calor anual.

a: Factor *a* en función del índice de calor anual.

(6) Determinar la ET mensual corregida en función de la latitud

$$ETP = ETP_{\text{sin corrección}} \left(\frac{N * d}{12 * 30} \right)$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial corregida.

N: Número máximo de horas de sol, en función del mes y latitud.

d: Número de días del mes.

2.4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

Para el cálculo de evapotranspiración real (ETR) se utilizaron como insumos los mapas resultantes de la ETP, PAM y los mapas de variación de reserva (VR) $VR_i = R_{ui} - R_{ui-1}$ (Ramírez, 2001). Sin embargo, para el cálculo de VR primero se llevaron a cabo las ecuaciones 7, 8 y 9 en el programa RStudio para obtener los mapas de déficit o superávit de agua, mapa mensual de la sumatoria del déficit de agua y mapa mensual de la reserva útil, los cuales son necesarios para la obtención de VR y por consiguiente la obtención de la ETR.

(7) PAM-ETP

Diferencia entre mapas de precipitación acumulada mensual y evapotranspiración potencial corregida

$$(8) (\Sigma d)$$

Sumatoria del déficit resultante de la ecuación 7 para cada mes, iniciando con el primer mes después del periodo de superávit de agua, sin contar los meses de superávit.

$$(9) \text{ Reserva útil } (Ru) = CC * e^{(\Sigma d * CC)}$$

Donde:

CC: capacidad de campo

e: constante e elevada a la potencia (X)

CONDICION PARA LA APLICACIÓN DE LA FORMULA: cálculo para cada mes a excepción del primer mes de superávit de agua, en el que se aplica la ecuación $(\Sigma d + Ru_{i-i})$ en el que $i = \text{al mes en curso}$.

2.4.5.1 CÁLCULO DE ETR

Para la obtención de los mapas mensuales y anuales de ETR se creó una función en el programa RStudio en el que se le indico lo siguiente:

(si) PAM < ETPM, entonces revisa (si) PAM + VRM > ETPM, si lo es, deja el valor de ETPM, si no, deja el valor de la suma de PAM + VRM, pero (si) PAM > ETPM entonces deja el valor de ETPM.

En decir:

Para los meses en que la PAM supere a la ETPM, la ETRM asume el valor de ETPM. Para los meses en que la PAM es menor a la ETPM, pero la PAM sumado al valor de la VRM es mayor a la ETPM, la ETRM asume el valor de ETPM, sino es así, tomará el valor de la suma de PAM más la VRM.

Esta función se aplicó utilizando los mapas en formato ráster de PA, ETP y VR mensuales, en el que se aplica la función pixel por pixel obteniendo como resultado un mapa de ETR mensual.

2.4.6 DÉFICT Y SUPERÁVIT HIDRICO

Finalmente, para completar el balance hídrico climático espacializado se llevó a cabo el cálculo del déficit y superávit hídrico mensual y anual de cada una de las microcuencas, para ello se emplearon las siguientes ecuaciones en el programa RStudio:

(10) Déficit hídrico mensual y anual ($\sum D_i$)

$$D_i = ETP_i - ETR_i$$

Donde:

ETP_i Evapotranspiración potencial corregida

ETR_i Evapotranspiración real

i mes en curso.

(11) Superávit hídrico mensual y anual ($\sum S_i$)

$$S_i = ETP_i - VR_i$$

Donde:

ETP_i Evapotranspiración potencial corregida

VR_i Variación de reserva

i mes en curso.

2.5 ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LA EXPANSIÓN AGUACATERA SOBRE EL BALANCE HÍDRICO EN LAS MICROCUENCAS

Finalmente, para analizar el impacto de la expansión aguacatera sobre el recurso hídrico superficial se siguieron tres pasos: a) clasificación de huertas de aguacate para el año 2020 según su etapa de desarrollo; b) estimación de los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate y c) comparación del balance hídrico contra los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate por microcuenca.

2.5.1 CLASIFICACIÓN DE HUERTAS DE ACUERDO CON SU ETAPA DE DESARROLLO

Mediante interpretación visual escala 1:5,000 y utilizado el SIG Qgis 3.10, se clasificaron por etapa de desarrollo las huertas de aguacate identificadas y delimitadas en el mapa 2020

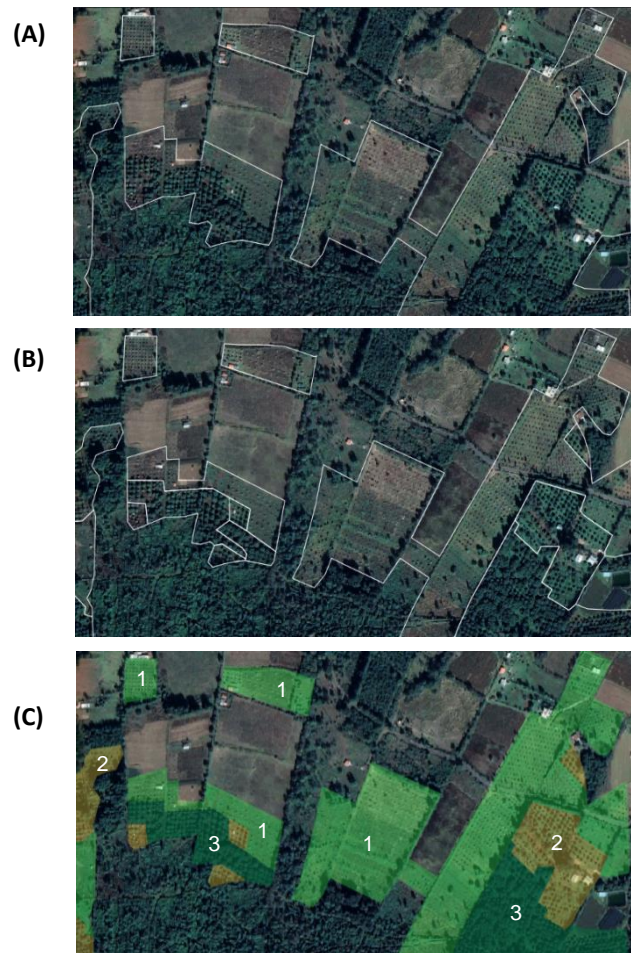
(Figura 9 (A)). Este proceso consistió en utilizar los polígonos 2020 e identificar los tamaños de copas observados en imágenes de muy alta resolución disponibles en la plataforma de Google Earth Pro correspondientes al año 2020 (utilizando el mosaico de imágenes (Figura 4)), segregando aquellos polígonos que presentaban varias etapas de desarrollo en su interior (Figura 9 (B)) con la finalidad de poder clasificar las huertas lo más homogéneas posibles, considerando tres categorías y siguiendo los siguientes criterios (Figura 9 (C)):

1) Huertas poco desarrolladas; árboles que visualmente se observen pequeños en cuanto a altura y diámetro de la copa, además, los árboles de aguacate que han sido plantados recientemente se pueden llegar a observar el diámetro del cajete realizado en el terreno para su plantación, así como objetos blancos que cubren las plantas del aguacate para protegerlas de las bajas temperaturas.

2) Huertas medianamente desarrolladas; árboles que visualmente se observan de poco tamaño en cuanto a altura como el tamaño de la copa, pero que a diferencia de los anteriores, estas huertas se ven bien establecidas, observándose muy poco el cajete donde están plantados, así como trazos bien definidos del sistema de plantación, además, estos árboles ya no son protegidos ante las temperaturas bajas por lo que no es posible observar ningún objeto en el terreno que acompañe al árbol, así mismo sus copas son de tamaños variables pero no llegan a traslaparse con árboles adyacentes.

3) Huertas desarrolladas; árboles que visualmente presentan una copa desarrollada, es decir árboles de mediano a gran tamaño, en donde se distingue un patrón de plantación pero que sus copas cubren gran parte del terreno (muchas de ellas se tocan entre sí) por lo que difícilmente se llega a observar el suelo.

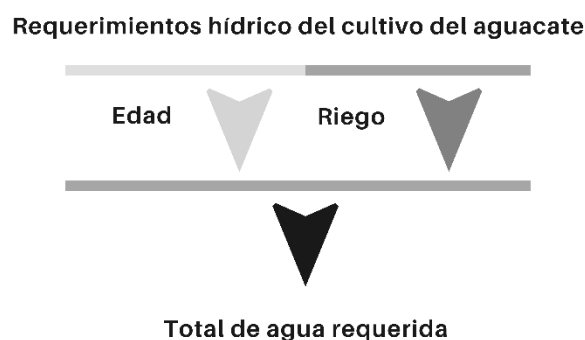
Figura 9. Clasificación visual de huertas de aguacate 2020 según su etapa de desarrollo.



2.5.2 REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL CULTIVO DEL AGUACATE

Se hizo una revisión bibliográfica de literatura académica, revistas indexadas, tesis de universidades, reportes gubernamentales y de instituciones privadas que abordan el tema hídrico del cultivo del aguacate. Se utilizaron como motores de búsqueda las plataformas de Google Académico, Scopus, BidiUNAM y Google en el que se usaron palabras clave: Aguacate, “requerimientos hídricos”, “riego”, “gasto hídrico”, “agua”, tanto en español como en inglés. Las búsquedas se filtraron considerando solo aquellos documentos que mencionaran datos específicos y que los relacionaran con alguna etapa de madurez o desarrollo del cultivo o árbol del aguacate. De esta manera se construyó una base de datos con los requerimientos hídricos de los árboles de aguacate en sus diferentes fases de crecimiento, así como una aproximación a la cantidad de agua aplicada por riego (Figura 10).

Figura 10. Construcción de la base de datos sobre los requerimientos hídricos del cultivo del aguacate.



De esta manera, y utilizando los valores obtenidos en la base de datos, se calculó la demanda aproximada de agua por cultivo de aguacate y se extrapolaron a la superficie obtenida de este cultivo por microcuenca. Se tuvo como referencia la edad aproximada de las huertas de aguacate en relación con la cantidad de agua requerida de acuerdo con la fase de crecimiento y de riego necesaria para su etapa productiva.

Una vez obtenidos los requerimientos hídricos del cultivo del aguacate por microcuenca, se llevó a cabo una comparación entre el balance hídrico y la demanda de agua del cultivo. Este proceso consistió en contrastar los datos de cada microcuenca para cada uno de los diferentes componentes del balance hídrico, identificando el déficit y superávit hídrico contra la demanda de agua necesaria para las huertas de aguacate.

3. RESULTADOS

3.1 EXTENSIÓN DE PLANTACIONES DE AGUACATE EN EL ORIENTE DE MICHOACÁN Y SUS MICROCUENCAS

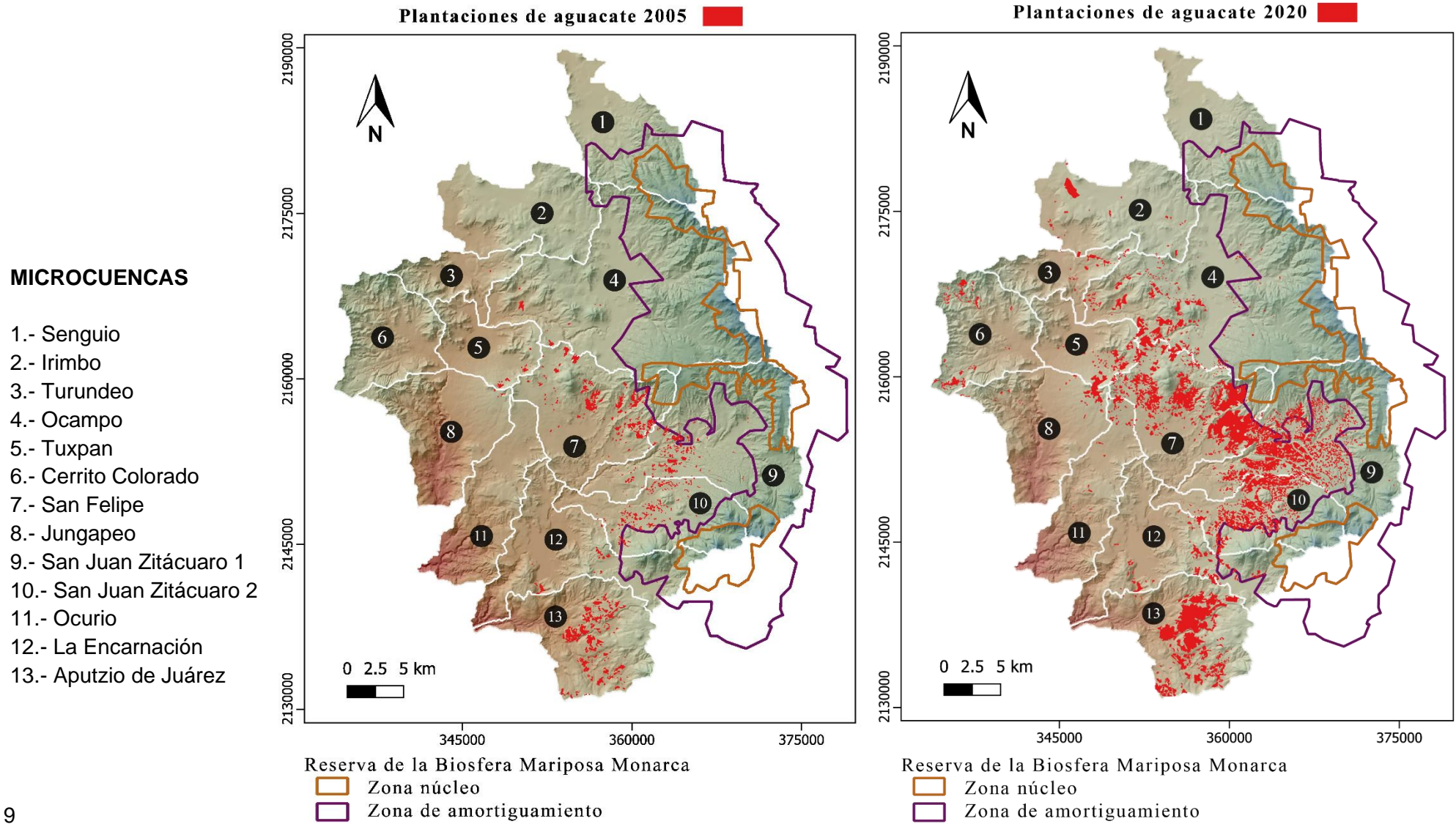
La extensión de huertas de aguacate identificadas en el oriente del estado de Michoacán fue de 2,030 hectáreas para el año 2005 (Cuadro 2 y Figura 11), aumentando a 9,626 hectáreas para el año 2020 distribuidas en 13 microcuencas. Siendo San Felipe, San Juan Zitácuaro 1 y Aputzio de Juárez, las microcuencas con la mayor superficie de huertas de aguacate del oriente del estado. En 2005, las huertas de aguacate se encontraban distribuidas en 10 microcuencas, de las cuales Aputzio de Juárez, San Felipe y San Juan Zitácuaro 1, fueron las que mayor superficie de aguacate presentaron, respectivamente.

Respecto a la superficie territorial de cada una de las microcuencas, Ocampo y San Juan Zitácuaro 1 (25,428 ha y 16,351 ha) son las de mayor superficie; Tuxpan y Turundeo las de menor superficie (5,040 ha y 4,191 ha).

Cuencas	Superficie de las microcuencas	Superficie aguacate (ha) 2005	Superficie aguacate (ha) 2020	Aguacate (año 2005) %	Aguacate (año 2020) %
San Felipe	11,081	587	2,414	5	22
San Juan Zitácuaro 1	16,351	304	2,145	2	13
Aputzio de Juárez	10,085	695	1,803	7	18
San Juan Zitácuaro 2	7,888	268	1,237	3	16
Ocampo	25,428	57	828	0	3
La Encarnación	11,080	68	278	1	3
Tuxpan	5,044	41	263	1	5
Cerrito Colorado	7,587	1	202	0	3
Irimbo	9,405	-	163	0	2
Jungapeo	9,368	7	130	0	1
Ocurio	7,914	-	83	0	1
Turundeo	4,191	2	69	0	2
Senguio	9,007	-	12	0	0.1
Total	134,429	2,030	9,626	1.5	7.2

Cuadro 2. Superficie de huertas de aguacate 2005 y 2020 por microcuenca. (NOTA: El porcentaje total de huertas de aguacate para el año 2005 y 2020 está calculado en función del total de la superficie de las microcuencas en conjunto)

Figura 11. Mapa de huertas de aguacate 2005- 2020 y sus microcuencas correspondientes.



3. 1. 1 CAMBIOS EN LA CUBIERTA Y USO DE SUELO 2005-2020

Entre 2005-2020 las huertas de aguacate presentaron un aumento de 7,596 hectáreas en el oriente del estado sobre otras cubiertas y usos del suelo, de las cuales; la agricultura de temporal y de riego han sido las principales cubiertas/usos del suelo en ser reemplazadas (4,797 ha), representando la mitad del total de la superficie transformada, seguidas por los bosques, con un 17 % del total de la superficie a huertas, tanto bosques cerrados como abiertos, seguidos de pastizales y en ultima proporción áreas con arbustos (Cuadro 3).

Cubiertas del suelo transformadas en huertas de aguacate 2005-2020	Total hectáreas	%
Plantaciones de aguacate 2005 (Sin cambio)	2,030	21
Cambios 2005-2020 de:		
Agricultura de temporal	3,732	39
Agricultura de riego	1,065	11
Pastizal	749	8
Arbustos	421	4
Bosque cerrado	871	9
Bosque abierto	757	8
	9,626	100

Cuadro 3. Cambio de cubiertas uso del suelo por expansión aguacatera (2005-2020)

La tasa de cambio del cultivo del aguacate a otras cubiertas es de 10.9 % para el área estudiada, mientras que lo que comprende el área de la RBMM para el estado de Michoacán presenta una tasa de cambio del 17.5 %.

Dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en 2005 se identificaron 39 ha de aguacate presentes en el área de amortiguamiento, aumentando a 441 ha para 2020. Estos cambios de cubierta y uso de suelo se han presentado en agricultura de temporal, pastizales y bosques, principalmente (Cuadro 4), para el periodo y área estudiada en la zona núcleo de la RBMM no se encontró presencia de huertas de aguacate.

Cubiertas del suelo transformadas en huertas de aguacate 2005-2020 dentro de la RBMM	Total hectáreas	%
Sin cambio (Plantaciones de aguacate 2005)	39	9
Cambios 2005-2020		
Agricultura de temporal	250	57
Agricultura de riego	12	3
Pastizal	53	12
Arbustos	12	3
Bosque cerrado	52	12
Bosque abierto	24	5
	441	100

Cuadro 4. Cambio de cubiertas uso del suelo por expansión aguacatera RBMM (estado de Michoacán) (2005-2020)

3.2 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO POR MICROCUENCA

Las temperaturas medias anuales del área de estudio oscilan entre los 11° C y 17° C, siendo Jungapeo y Ocurio las microcuencas con los valores más altos, contrario de Ocampo y Senguio que presentan temperaturas medias de 11 °C y 12°C (Figura 5 y Figura 7). Por otra parte, las microcuencas con mayor precipitación anual son: San Juan Zitácuaro 1 y Aputzio de Juárez (1,146 y 1,112 mm respectivamente), Jungapeo y Tuxpan las que presentan una menor cantidad (795 y 837 mm respectivamente) (Cuadro 5).

La evapotranspiración potencial anual (ETP) calculada para el área de estudio se encuentra entre los 665 mm y 904 mm (promedio), en donde Ocurio presenta los valores más elevados y Ocampo los más bajos. Por otro lado, la evapotranspiración real anual (ETR) se encuentra entre los 525 mm y 635 mm, Ocurio presenta los valores más altos y Ocampo los más bajos. En cuanto al déficit hídrico, el valor más alto lo presenta Ocurio (283 mm) y el más bajo San Juan Zitácuaro 1 y 2 (109 mm, 110 mm respectivamente), mientras que el superávit hídrico más alto lo tiene San Juan Zitácuaro 2 (553 mm) y Jungapeo (183 mm) el más bajo. (Cuadro 5, Figura 12 al 17).

Cuencas	T° media anual (C°)	Pp anual acumulada (mm)	Etp anual promedio (mm)	Etr anual promedio (mm)	Déficit hídrico anual (mm)	Superavít hídrico anual (mm)
Senguio	12	900	697	556	140	344
Irimbo	13	981	724	585	139	396
Turundeo	15	1,062	778	602	176	460
Ocampo	11	1,066	665	525	140	541
Tuxpan	15	837	793	590	204	247
Cerrito Colorado	14	1,027	744	614	145	428
San Felipe	15	1,014	757	567	190	447
Jungapeo	17	795	888	625	276	183
San Juan Zitácuaro 1	13	1,061	674	574	109	496
San Juan Zitácuaro 2	13	1,146	703	598	110	553
Ocurio	17	869	904	635	283	249
La Encarnación	16	1,000	815	597	225	409
Aputzio de Juárez	16	1,112	823	611	212	501

Cuadro 5. Temperatura media anual, precipitación anual acumulada, evapotranspiración potencial corregida, déficit hídrico y superavít hídrico en microcuencas asociadas a huertas de aguacate en el oriente de Michoacán.

Figura 12. Temperatura media anual

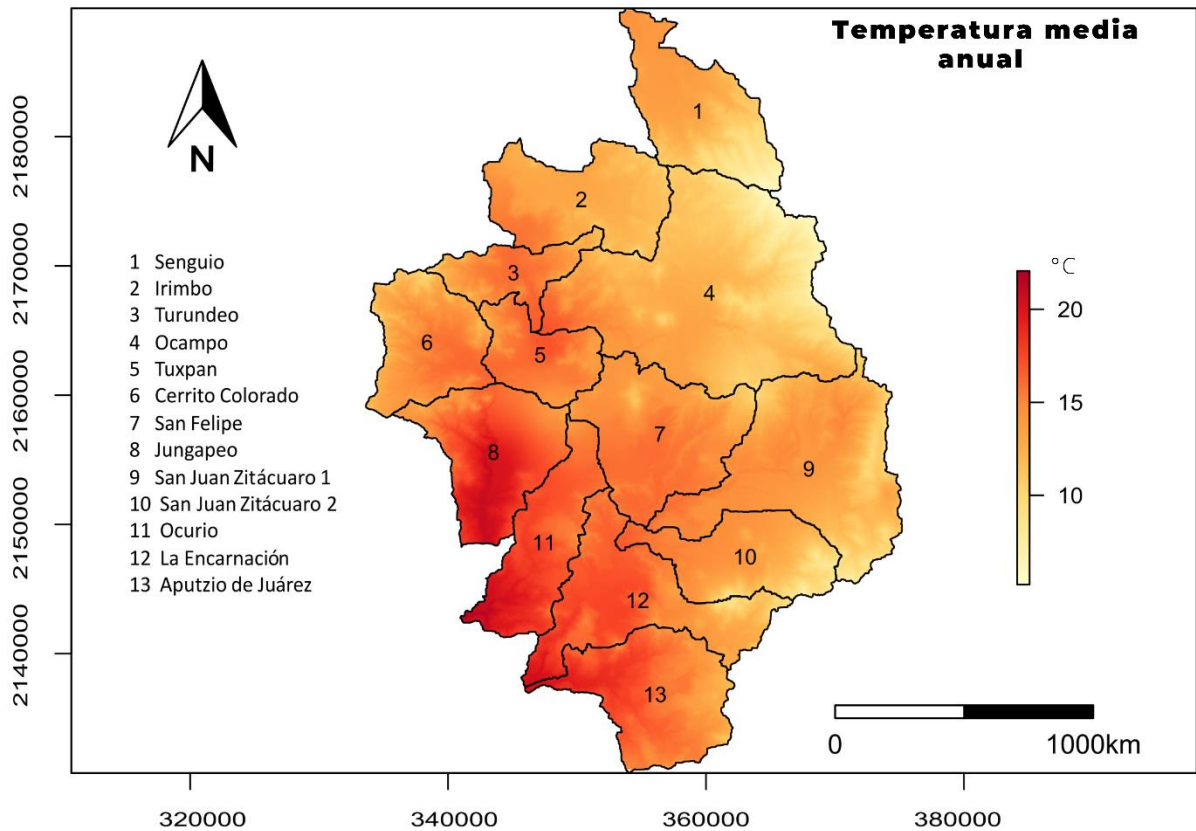


Figura 13. Precipitación anual acumulada

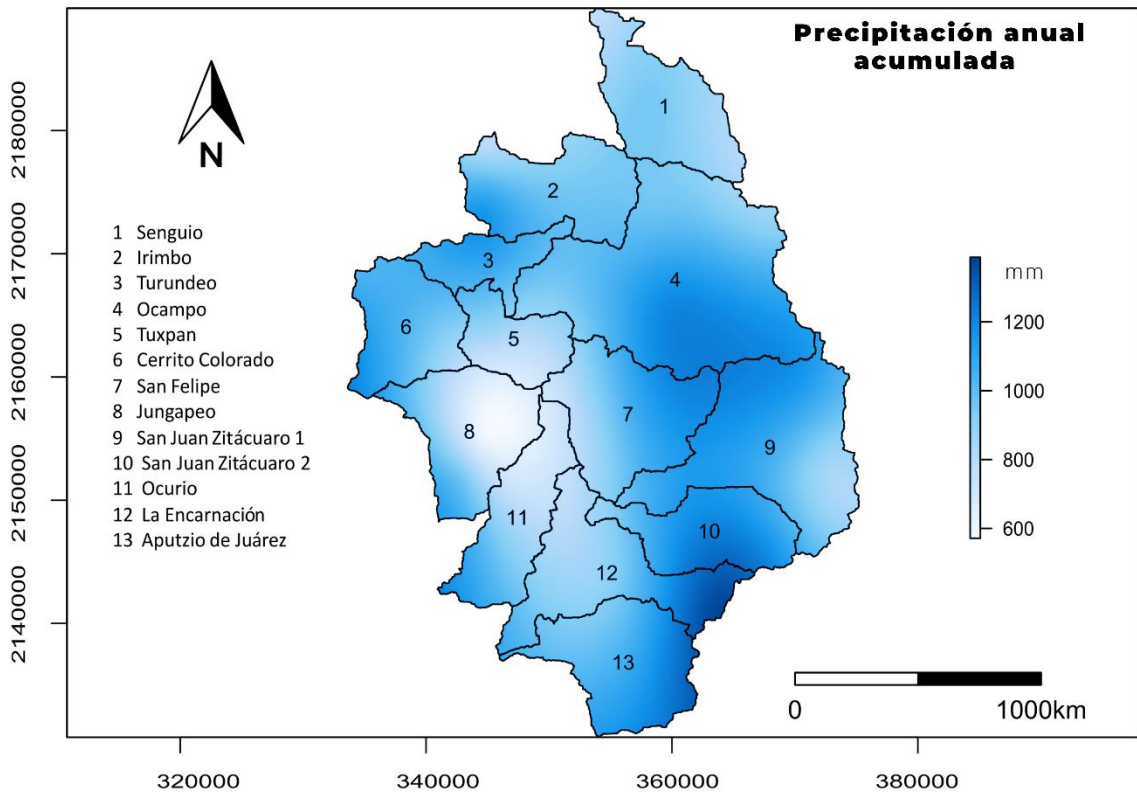


Figura 14. Evapotranspiración potencial corregida anual

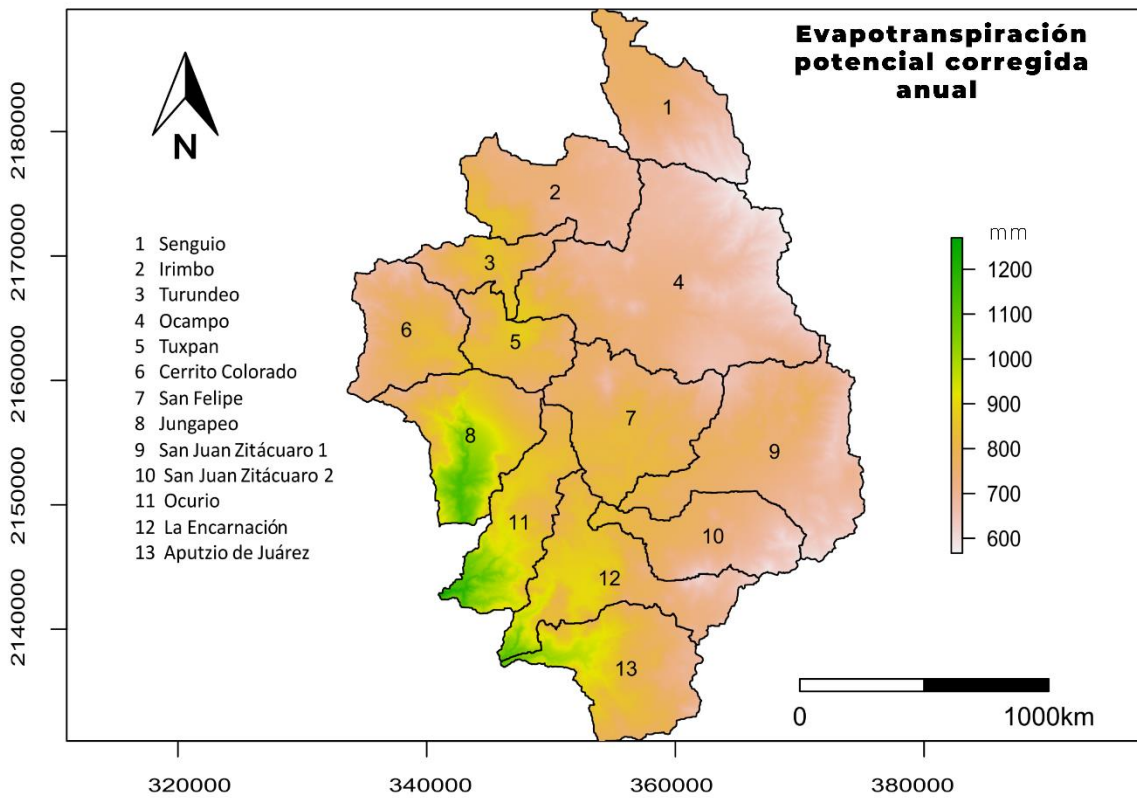


Figura 15. Evapotranspiración real anual

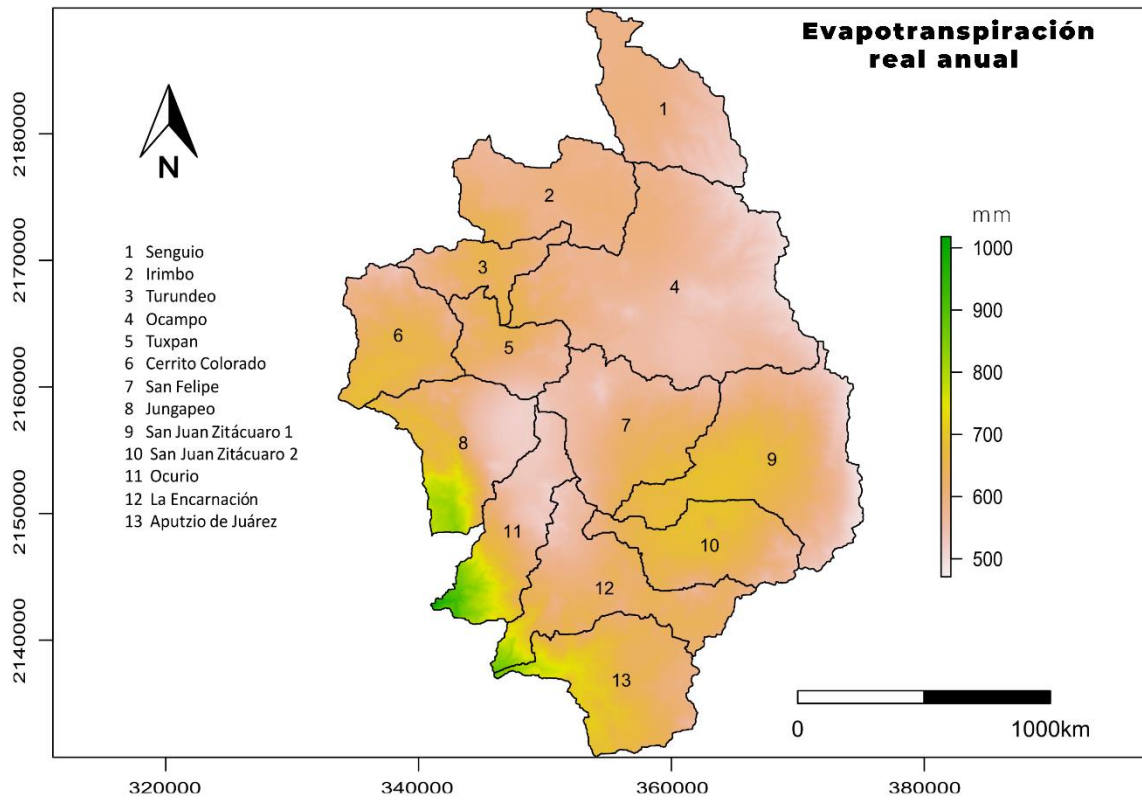


Figura 16. Déficit hídrico anual

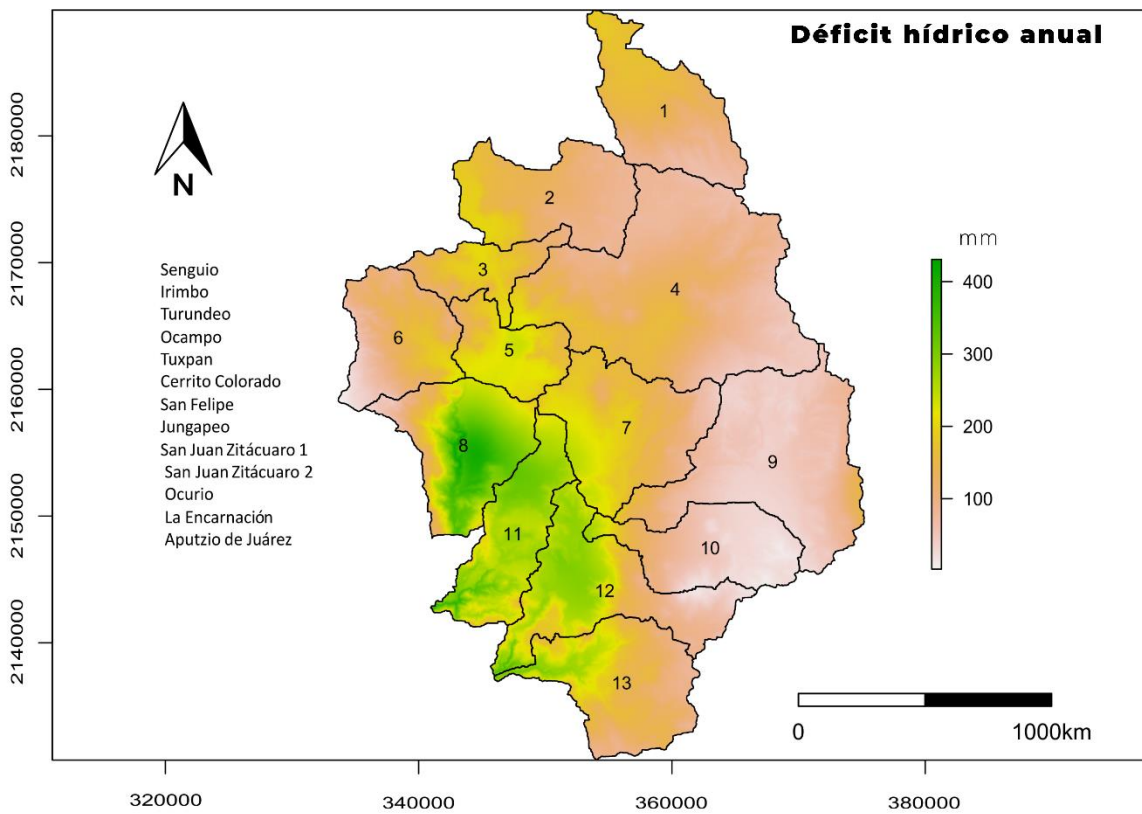
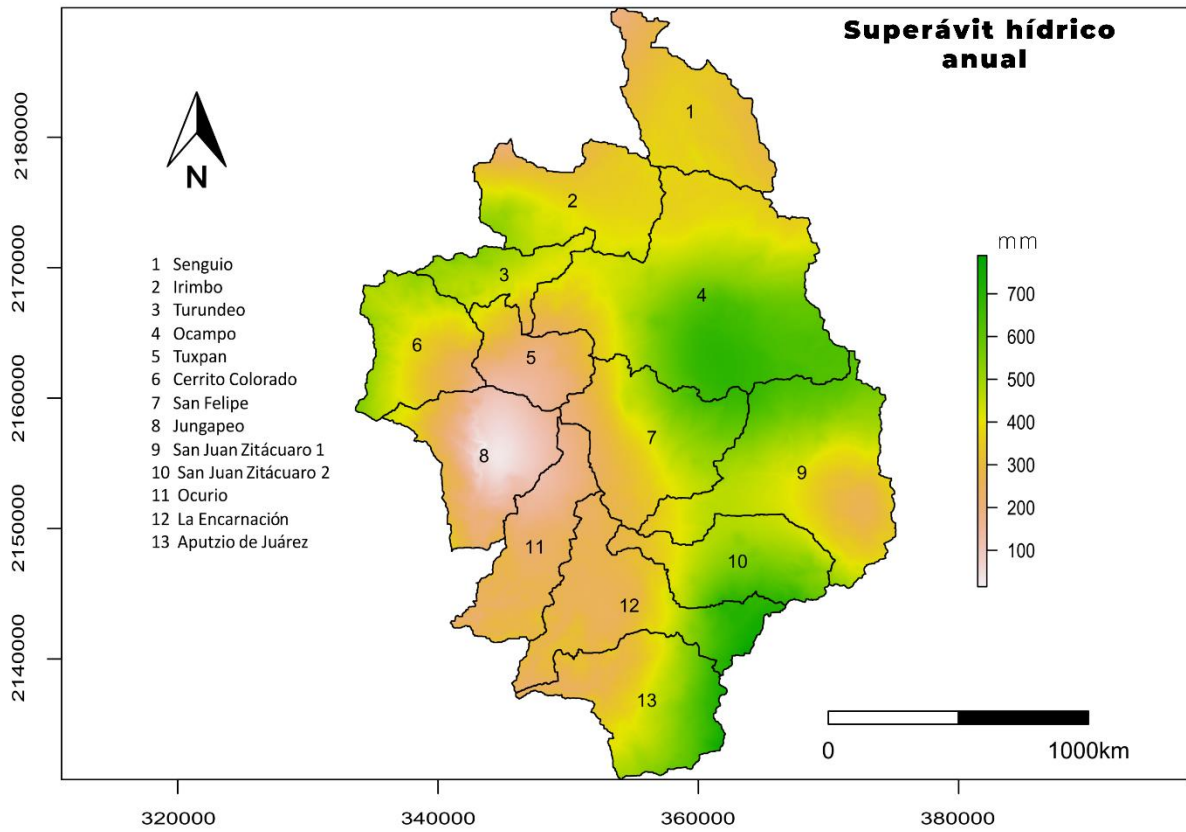


Figura 17. Superávit hídrico anual



Así mismo, el balance hídrico permite distinguir la época de estiaje entre los meses de noviembre a mayo, donde la evapotranspiración real es mayor que la precipitación. Por lo que, estos meses presentan un déficit hídrico, a diferencia de los meses de junio a octubre (época de lluvia), en los cuales existe un superávit hídrico, donde las precipitaciones aumentan considerablemente sobrepasando la evapotranspiración real y potencial (Figura 18, 19 y Anexo 2).

Figura 17. Balance hídrico microcuenca Senguio

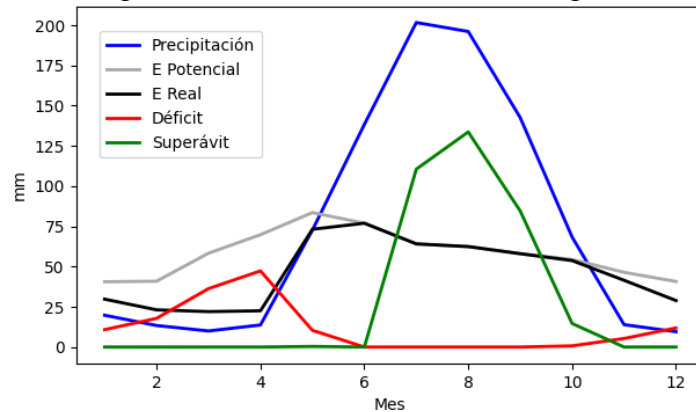
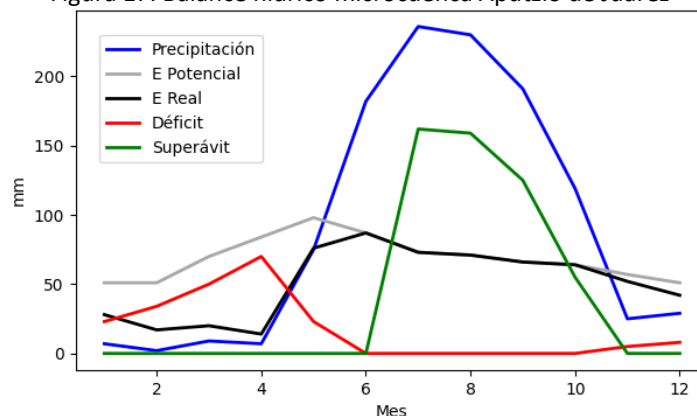


Figura 17. Balance hídrico microcuenca Aputzio de Juárez



3.3 EFECTO DE LA EXPANSIÓN AGUACATERA SOBRE EL BALANCE HÍDRICO EN LAS MICROCUENCAS

3.3.1 CLASIFICACIÓN DE HUERTAS POR EDAD Y DEMANDA HÍDRICA

El 72 % de la superficie correspondiente a las huertas de aguacate identificadas en el oriente del estado son desarrolladas (árboles con una copa desarrollada, arboles de gran tamaño), seguidas por huertas medianamente desarrolladas y recién plantadas con un 15 % y 12 % respectivamente (Cuadro 6).

Descripción	Etapas	Superficie (ha)	%
Huertas poco desarrolladas	1	1,487	15
Huertas medianamente desarrolladas	2	1,187	12
Huertas desarrolladas	3	6,952	72
Total general		9,626	100

Cuadro 6. Clasificación visual de huertas de aguacate de acuerdo con su etapa de desarrollo en el año 2020

La demanda hídrica del cultivo de aguacate varía considerablemente dependiendo de la fase de crecimiento del árbol, así como del rango altitudinal y climático en el que se encuentre (Cuadro 6). Para árboles recién plantados la demanda puede ir desde 0.54 L/m²/día a 0.98 L/m²/día, solo para satisfacer las necesidades hídricas de la planta. Para plantas de huertas jóvenes se necesita aplicar un riego de 6,224 L/árbol/año (época de estiaje – diciembre-mayo). En los árboles maduros la demanda puede variar desde 389 L/m²/año a 1,050 L/m²/año (Cuadro 7).

DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO DEL AGUACATE		
Fase de crecimiento		
Etapa de desarrollo	Demanda	Fuente
Poco desarrolladas	0.54 a 0.98 L/m ² /día	Gómez Tagle et al., 2018
Desarrolladas	62 a 103 L/árbol/día	
Desarrolladas	36.6 L/árbol/día	Bravo et al. 2009
Riego		
Etapa de desarrollo	Riego para periodo de estiaje (diciembre a mayo)	Fuente
Poco desarrolladas	747 L/árbol/año promedio	Tapia y Bravo 2009
Medianamente desarrolladas	6,224 L/árbol/año promedio	
Desarrolladas	13,920 L/árbol/año promedio	
	500 a 1000 L/ m ² /año	Villalpando 1985; Ruiz et al., 1998; Tapia, 1999
	572 L/ m ² /año	Lahav et al., (1992)
	491 L/ m ² /año	Alcántar y Aguilera (1997)
	437 L/ m ² /año	Tapia et al. (2006)
	458.8 L/ m ² /año	Anguiano et al. 2006
	389.4 L/ m ² /año	
	530.1 L/ m ² /año	
	480 L/ m ² /año	Sánchez et al., (2001)
	1050 L/ m ² /año	Homsky (2000)

Cuadro 7. Demanda hídrica del cultivo del aguacate. Elaboración propia a partir de la revisión bibliografía.

Una vez escalados estos últimos datos con la clasificación de huertas obtenemos que la demanda hídrica total del cultivo de aguacate en el oriente del estado es de 158,156.86 m³/día. Las microcuencas con una demanda superior son San Felipe, San Juan Zitácuaro 1 y Aputzio de Juárez con 46,477.36, 38,100.88 y 29,481.49 m³/día respectivamente. Las microcuencas con la menor demanda son Senguio, Turundeo y Ocurio con 98.40 m³/día, 1,127.68 y 1,182.83 m³/día respectivamente (Cuadro 8).

Cuencas	Superficie de la microcuenca (ha)	Superficie por etapa de desarrollo del aguacate (año 2020) (ha)			Demanda hídrica de las plantaciones/fenología/superficie (m³/día/superficie)				Demanda hídrica/riego/superficie (m³/día/superficie)				Demanda hídrica total m³/día/sup
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa1	Etapa 2	Etapa 3	Total m³/día/sup.	Etapa1	Etapa2	Etapa3	Total m³/día/sup	
Senguio	9,007	6	3	3	1	16	28	45	4	15	34	54	98
Irimbo	9,405	98	29	37	8	158	346	512	60	147	426	634	1,145
Turundeo	9,803	10	11	49	1	58	452	511	6	54	557	617	1,128
Ocampo	10,201	369	194	265	30	1,065	2,468	3,563	227	995	3,040	4,262	7,825
Tuxpan	10,599	58	38	167	5	208	1,553	1,766	36	195	1,913	2,143	3,909
Cerrito Colorado	10,997	89	26	87	7	143	810	961	55	134	998	1,187	2,148
San Felipe	11,395	125	117	2,172	10	642	20,231	20,883	77	600	24,917	25,594	46,477
Jungapeo	11,793	44	24	62	4	134	575	713	27	125	708	860	1,573
San Juan Zitácuaro 1	12,191	219	205	1,721	18	1,127	16,028	17,173	135	1,053	19,740	20,928	38,101
San Juan Zitácuaro 2	12,589	136	243	858	11	1,334	7,996	9,341	84	1,246	9,849	11,178	20,519
Ocurio	12,987	15	23	45	1	125	417	543	9	116	514	640	1,183
La Encarnación	13,385	46	28	204	4	155	1,898	2,057	28	145	2,338	2,511	4,568
Aputzio de Juárez	13,783	273	246	1,283	22	1,350	11,956	13,327	168	1,261	14,725	16,154	29,481
Total	14,181	1,487	1,187	6,952	122	6,515	64,760	71,395	916	6,087	79,759	86,762	158,157

Cuadro 8. Demanda hídrica del cultivo del aguacate necesaria para el crecimiento de la planta y el riego necesario para la producción. Para la construcción del cuadro se utilizaron los siguientes datos de acuerdo con la demanda hídrica= Etapa1 =0.54L/árbol/día, Etapa 2= 36.6 L/árbol/día, Etapa 3= 62 L/árbol/día. Para la demanda hídrica por riego: Etapa 1= 747 L/árbol /año, Etapa 2= 6,224 L/árbol/año y Etapa 3= 13,920 L/árbol/año (estos últimos 3 valores se dividieron entre 182 días correspondientes al periodo de estiaje de la zona).

3.3.2 BALANCE HÍDRICO Y DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO DE AGUACATE

Dentro de las microcuencas con una diferencia negativa entre el superávit y déficit hídrico destacan las microcuencas de Jungapeo y Ocurio, las cuales presentan saldos negativos. Lo que significa que presentan un periodo mayor de déficit hídrico en relación con el superávit durante el año. Así mismo, la microcuenca de Tuxpan, si bien no presenta valores negativos la diferencia entre el déficit y superávit hídrico es muy baja (Cuadro 9).

Es muy importante destacar que la demanda hídrica del cultivo de aguacate presente en la microcuenca de Tuxpan es alta, de 64% respecto a la diferencia entre los promedios del déficit y superávit hídrico, de igual manera San Felipe con 59% y Aputzio de Juárez con el 36%, respectivamente (Cuadro 9). Además, como ya se mencionó anteriormente, Tuxpan presenta valores muy similares entre su déficit y superávit hídrico a lo largo del año, y San Felipe y Aputzio de Juárez entre las microcuencas con mayor demanda hídrica por cultivo de aguacate en la región (Cuadro 6), así como de las que mayor superficie de aguacate presentan, principalmente San Felipe, presentando la mayor superficie de plantaciones de aguacate de la región (Cuadro 2).

	Microcuencana sup. (ha)	Déficit hídrico m ³ /año/sup.	Superávit hídrico m ³ /año/sup.	S/D	m ³ /año/sup. aguacate	% (m ³ /año/sup. aguacate y S)
Senguio	9,007	12,610,346	30,985,422	18,375,076	35,425	0.2
Irimbo	9,405	13,073,186	37,244,473	24,171,287	412,268	1.7
Turundeo	4,191	7,376,019	19,278,232	11,902,213	405,965	3.4
Ocampo	25,428	35,598,612	137,563,208	101,964,596	2,817,020	2.8
Tuxpan	5,044	10,290,352	12,459,396	2,169,045	1,407,366	64.9
Cerrito Colorado	7,587	11,000,788	32,471,290	21,470,503	773,142	3.6
San Felipe	11,081	21,054,261	49,532,919	28,478,658	16,731,853	58.8
Jungapeo	9,368	25,856,812	17,144,190	-8,712,621	566,303	6.5
San Juan Zitácuaro 1	16,351	17,822,721	81,101,555	63,278,834	13,716,318	21.7
San Juan Zitácuaro 2	7,888	8,676,679	43,620,032	34,943,353	7,387,013	21.1
Ocurio	7,914	22,395,290	19,704,690	-2,690,600	425,822	15.8
La Encarnación	11,080	24,929,325	45,315,973	20,386,648	1,644,637	8.1
Aputzio de Juárez	10,085	21,380,052	50,525,499	29,145,448	10,613,338	36.4
Total	134,429	3,157,734,156	7,062,892,830	3,905,158,674	56,936,470	1.5

Cuadro 9. Déficit y superávit hídrico por microcuencana versus la demanda hídrica del cultivo del aguacate necesaria para el crecimiento de la planta y el riego necesario para la producción de la fruta (bajo un esquema de producción).

4. DISCUSIÓN

Le expansión e intensificación del cultivo de aguacate en la zona oriente ha aumentado considerablemente, ya sea por el alto valor económico que representa el cultivo a nivel global, o bien, por los desplazamientos esperados del cultivo a raíz del cambio climático hacia latitudes mayores (Chávez-León et al., 2012; Charré-Medellín et al., 2021; CONANP, 2023; Denvir, 2023).

En la zona oriente, se ha podido observar la dinámica de CCUS que se ha dado en otras zonas por el incremento del cultivo de aguacate. En donde, en las primeras fases se efectúa el remplazo de cultivos tradicionales (principalmente de agricultura de temporal a huertas de aguacate) (Cuevas y Morales, 2012; Gómez Tagle et al., 2018), ya que las cubiertas y usos del suelo que presentan los cambios más elevados son la agricultura de temporal y de riego. Posteriormente se da una expansión del cultivo (reemplazo de bosques de pino y pino-encino a huertas de aguacate) (Morales y Cuevas, 2012; Chávez-León et al., 2012, Mas et al., 2017; Gómez Tagle et al., 2018; Arima et al., 2022), principalmente por que llegan a ocupar la mayoría de los terrenos agrícolas disponibles, aumentando la presión y cambio de uso de suelo hacia terrenos forestales. Esta última dinámica, se observa claramente en los resultados, ya que las cubiertas y usos del suelo más afectadas por la expansión de las plantaciones de aguacate después de la agricultura son los bosques, ya sea bosques conservados o con algún grado de degradación, lo que concuerda con lo expuesto por Arima (2022) y Denvir (2023).

Es importante señalar, que los datos obtenidos en cuanto a la extensión total de cultivos de aguacate identificados en la zona oriente del estado, difieren considerablemente de los reportados oficialmente en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP 2020a y 2020b). En el SIAP se tienen registradas 1,281 ha y 2,308 ha para los años 2003 y 2020, respectivamente, a diferencia de las 2,030 ha y 9,626 ha para el año 2004 y 2020, identificadas en el presente trabajo. Esto se puede deber a que el SIAP no cuenta con el registro de las huertas presentes en el área, o bien, que la mayoría de las huertas se

establecen sin ningún trámite o autorización oficial específica. Es así, que los datos proporcionados por el SIAP presentan una subestimación de lo que realmente está ocurriendo en la zona.

De esta manera, el crecimiento anual del cultivo del aguacate es del 10% para el total de la zona oriente y 16% para el área que comprende solamente la RBMM dentro del estado de Michoacán, lo cual es muy similar a las tasas de crecimiento productivas vistas a nivel nacional en cuanto a este cultivo se refiere. La producción nacional ha crecido a una tasa de 8% de 2009 a 2020 y el valor económico ha aumentado a una tasa del 18% anual (Global Forest Watch, 2020). Así mismo, las tasas de pérdida de bosque por expansión del aguacate en Michoacán entre los años 1976-2007, 1990-2006, 1996-2005 y 1975-2008 fueron de 33%, 170%, 240 %y 95% respectivamente (Bravo et al., 2012). Por otra parte, Cho y colaboradores (2021) estimaron que entre 2001 y 2017, aproximadamente el 20% de la deforestación total en Michoacán estaba asociada a la expansión de las plantaciones de aguacate. De esta manera, las tasas de cambio obtenidas en el presente trabajo por expansión del cultivo de aguacate se encuentran por debajo de las reportadas, sin embargo, no se pueden comparar estrictamente, ya que la escala de análisis difiere considerablemente.

En cuanto a la clasificación de huertas de aguacate según su etapa de desarrollo mediante interpretación visual, es el primer estudio realizado en la zona y en el estado, en el cual se busca tener una primera aproximación al consumo de agua por este cultivo a nivel de microcuena. Dependiendo la etapa de desarrollo de las huertas sus requerimientos hídricos varían considerablemente (Anguiano et al., 2007; Bravo et al., 2009; Rocha-Arroyo et al., 2011; Gómez Tagle et al., 2018), lo que tiene un impacto directo en la cantidad de agua que pueda demandar este cultivo.

Asimismo, este análisis permitió identificar que actualmente se siguen estableciendo nuevas huertas. Se encontró que, del total de la superficie reportada para este trabajo, el 15% pertenece a huertas recién plantadas. Esto es importante, porque aunque se mantenga o disminuya la tasa de cambio de aquí a 10 años, la demanda hídrica aumentaría

considerablemente, debido a que el 27% de huertas medianamente y poco desarrolladas, pasarían a ser huertas desarrolladas en etapa productiva, aumentando así el requerimiento hídrico actual de 158 mil km³/día aproximadamente, lo que es equiparable al agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas de 1 millón y medio de personas (100 litros por persona por día, ONU, 2014), en otras palabras, abastecería a ciudades medias como Morelia, que cuenta con un total de 849,053 habitantes (INEGI, 2020).

Aunado a esto, se identificaron microcuencas como Jungapeo y Ocurio, que presentan saldos negativos en cuanto a la diferencia entre el déficit y el superávit hídrico, así como las microcuencas de Tuxpan y San Felipe con una demanda hídrica del cultivo de aguacate muy alta con respecto a la diferencia entre el superávit y déficit hídrico (más del 50%). Destacando que San Felipe y Tuxpan son grandes productores agrícolas de cultivos como; guayaba, noche buena, flores ornamentales, entre otros. Haciendo hincapié en que de acuerdo al análisis espacial del déficit y superávit hídrico (balance hídrico), podemos localizar puntualmente las zonas de mayor preocupación o interés.

Otros problemas asociados con la expansión agroindustrial del aguacate son: la implementación de ollas para la captación de agua de lluvia que interrumpen el ciclo hidrológico; el cambio de uso de suelo de tierras forestales a agrícolas, considerando que el cultivo de aguacate consume 4 veces más agua que los pinos (Gómez Tagle et al., 2018, Gómez Tagle et al., 2019; Gómez-Tagle et al., 2022); el cambio de agricultura de temporal a una agricultura intensiva de alto impacto ecológico; la expansión de áreas urbanas; y la contaminación del agua que este cultivo puede causar (Bravo et al., 2012; Merlo Reyes 2018; Borrego y Carlon, 2021).). Todo ello coloca a estas microcuencas como focos rojos de posibles conflictos entre los usuarios del agua y otras problemáticas relacionadas al recurso hídrico si no se implementa de manera oportuna un ordenamiento territorial que considere la producción sustentable de este cultivo, como bien lo advierten Gómez-Tagle y colaboradores (2022) para el municipio de Uruapan.

Adicionalmente, se ratifica la presión existente por la expansión del cultivo del aguacate hacia la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca el cual se expone en documento “Impactos de la expansión del cultivo del aguacate sobre las Áreas Naturales Protegidas de México” (CONANP, 2023), donde los límites tanto de la zona de amortiguamiento como núcleo han servido de barrera para frenar un poco la expansión e intensificación del cultivo, ya que se observa visualmente como el área de cultivo sigue los límites de estas dos zonas, y en algunos casos se ve cómo se interrumpe su avance.

5. CONCLUSIONES

Existe un claro proceso de expansión del cultivo de aguacate en el oriente del estado de Michoacán, donde se ha incrementado la superficie de este cultivo de 2,030 hectáreas a 9,626 hectáreas un periodo de solo 15 años (2005-2020). El mayor incremento de huertas de aguacate se ha dado sobre áreas agrícolas de temporal y de riego, seguido de un cambio de uso de suelo de bosques de pino, y pino-encino tanto conservados como en algún grado de degradación.

Dentro de la RBMM existe un proceso de expansión del cultivo de aguacate al igual que en el resto de la zona. Donde se ha visto una disminución principalmente en la agricultura de temporal, bosques de pino, pino-encino y pastizales. Por lo que es necesario regularizar la frontera agrícola e implementar la normatividad establecida dentro del Programa de Manejo del Área Natural Protegida.

Es necesario implementar estudios enfocados a la disponibilidad de agua superficial y subterránea, así como estrategias de gestión hídrica, ya que la demanda hídrica del cultivo de aguacate aumentara en los próximos años, lo que podría desencadenar una serie de conflictos en relación con el uso y distribución del agua en las diferentes microcuencas.

El presente trabajo es una primera aproximación de análisis de las dinámicas de cambio de cubierta y uso de suelo por cultivo de aguacate centrado en el nuevo polo de expansión de este cultivo en el oriente de Michoacán. Adicionalmente incorpora otras variables como la

demanda hídrica del cultivo y sus efectos sobre el balance hídrico de las diferentes microcuencas que conforman la zona.

El balance hídrico climático espacializado permite identificar el déficit y el superávit hídrico a nivel territorial, permitiendo identificar las problemáticas diferenciales de zonas específicas. Los modelos generados permitirían incluir otras variables más, pero ante la falta de datos directos en campos (por ejemplo, mediciones de caudal), son una herramienta útil como primera aproximación de la situación hídrica de la zona.

Finalmente, la presente investigación puede contribuir a los diversos planes de manejo territorial (municipales, comunitarios, de cuenca o del área protegida) de la región, ya que muestra como se ha expandido el cultivo del aguacate en el Oriente de Michoacán con mayor precisión que las estadísticas oficiales. Así mismo, proporciona una idea del riesgo que representa la expansión del cultivo del aguacate para el balance hídrico en las cuencas de la región, así como la presión hacia las masas forestales que conforman la conforman el ANP

6. REFERENCIAS

- Anduaem, T. G., Belay, G., & Guadie, A. (2018). Land use change detection using remote sensing technology. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 9(10), 6. DOI: 10.4172/2157-7617.1000496
- Anguiano, C. J., Alcántar, J., Toledo, R., Tapia, L., Ruíz, J., & Vidales-Fernández, J. (2007). Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate de Michoacán. *Libro Técnico. INIFAP*, Uruapan, Michoacán, México.
- Arima, E. Y., Denvir, A., Young, K. R., González-Rodríguez, A., & García-Oliva, F. (2022). Modelling avocado-driven deforestation in Michoacán, Mexico. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034015. DOI: 10.1088/1748-9326/ac5419
- Borrego, A., & Allende, T. C. (2021). Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en Mexico. *Journal of Latin American Geography*, 20(1), 154-185. DOI: 10.1353/lag.2021.0006
- Bravo, M., Sánchez, J., Vidales, J. A., Sáenz, J., Chávez, J., Madrigal, S., Muñoz, H. J., Tapia, L. M., Orozco, G., Alcántar, J. J., Vidales, I. & Venegas, E. (2009). "Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán". Campo Experimental Uruapan. México: Instituto Nacional De Investigaciones Forestales Agrícolas Y Pecuaria. Disponible en: http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/libro_aguacate.pdf [Consultado 18-01-2019]
- Brower, L. P., Slayback, D. A., Jaramillo-López, P., Ramirez, I., Oberhauser, K. S., Williams, E. H., & Fink, L. S. (2016). "Illegal logging of 10 hectares of forest in the Sierra Chincua monarch butterfly overwintering area in Mexico". *American Entomologist*, 62(2), 92-97. DOI: 10.1093/ae/tmw040

Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L. F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B. y Wiberg, D. 2016. *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report)*. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). pure.iiasa.ac.at/13008

Burgos, A., & Bocco, G. (2015). La cuenca hidrográfica como espacio geográfico. Dimensiones sociales en el manejo de cuencas, México: CIGA-UNAM. pp, 11-29.

CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria) (2017). “Reporte. Caso de exportación: El aguacate”. Ciudad de México. Disponible en: <https://bit.ly/2TiQlak> [Consultado 03-10-2020]

Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, ML. (2012). “Perdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010)”. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2), pp. 143-157. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074

Charre-Medellín, J. F., Mas, J. F., & Chang-Martínez, L. A. (2021). Potential expansion of Hass avocado cultivation under climate change scenarios threatens Mexican mountain ecosystems. *Crop and Pasture Science*, 72(4), 291-301. DOI:10.1071/CP20458

Chávez-León G., Tapia, L. M., Bravo, M., Sáenz, J. T., Muñoz, H. J., Vidales, I., Larios, A., Rentería, J. B., Villaseñor, F. J., Sánchez, J., Alcantar, J. J., & Mendoza, M. (2012). “Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate”. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. *Libro Técnico* Núm. 13. Disponible en <https://n9.cl/ez1wy> [Consultado 10-02-2020]

Cho, K., Goldstein, B., Gounaridis, D., & Newell, J. P. (2021). Where does your guacamole come from? Detecting deforestation associated with the export of avocados from Mexico to

the United States. *Journal of Environmental Management*, 278, 111482.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111482>

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2001). "Cuencas Hidrológicas". Escala 1:250000. México.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018). "Estadísticas del agua en México, edición 2018". México. Disponible en: <https://n9.cl/5a9wt> [Consultado 14-02-2021]

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2020). Información Climatológica, Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://n9.cl/hw2at> [Consultado 4- 09-2020]

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2000). "Programa de manejo de la reserva de la biosfera mariposa Monarca". Disponible en <https://bit.ly/2XbQgGm> [Consultado 22- 12-2018]

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2023). "Impactos de la expansión del cultivo del aguacate sobre las Áreas Naturales Protegidas de México". Diagnóstico y Plan de Acción. [Consultado 10-08-2023]

Denvir, A. (2023). Avocado expansion and the threat of forest loss in Michoacán, Mexico under climate change scenarios. *Applied Geography*, 151, 102856.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102856>

Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. *Cepal*. ISBN: 92-1-322070-7

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (1996). "Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes". Number 130, Rome.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2021). “El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite”. ISBN 978-92-5-135423-0
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2016). “Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. El estado mundial de la agricultura y la alimentación”. Roma: Italia. ISBN 978-92-5-309374-8
- Faraway, J. J. (2006) “Repeated measures and longitudinal data”, en *Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models*, pp. 1–28. DOI: 10.1111/j.1541-0420.2006.00596_12.x
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). “Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization”. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152(1), pp. 17–30. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.08.004
- Gao, Y., Gonzalez, I., Gonzalez, R., Lopez-Sanchez, J. G., Skutsch, M., Paneque-Gálvez, J., & Mas, J. F. (2016, September). Forest cover change analysis by object based method using spot and rapideye images. In *6th International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis, GEOBIA 2016: Solutions & Synergies*. University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). ISBN: 978-90-365-4201-2
- García, E. 1998. “Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)”. Escala 1:1000000. México.
- Gobierno de México (2019). “¿Sabes cuánta agua consumes?”. Página Web. Disponible en: <https://n9.cl/9rj06> [Consultado 22- 12-2018]

- Gómez, L. y Medina, M. de la paz (2012). “Guía de métodos estadísticos en climatología”. *Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras*. DGAPA-PAPIME. UNAM.
- Gómez-Tagle, A. F., Gómez-Tagle, A., Fuerte-Velázquez, D. J., Barajas-Alcalá, A. G., Quiroz-Rivera, F., Alarcón-Chaires, P. E., & Guerrero-García-Rojas, H. (2022). Blue and Green Water Footprint of Agro-Industrial Avocado Production in Central Mexico. *Sustainability*, 14(15), 9664. <https://doi.org/10.3390/su14159664>
- Gómez-Tagle, A., Morales-Chávez, R., García-González, Y., Francisco, A., & Rojas, G. T. (2020). Partición de la precipitación en cultivo de aguacate y bosque de pino-encino en Michoacán, México. *Biológicas*, 21, 1-18.
- Gómez-Tagle, A., Morales-Chavez, R., Quiroz, F., García, Y & Toledo-López, L. (2018). “Hydrological impact of the green gold (avocado culture) in central Mexico; rainfall partition and water use comparison with native forests”. *Conferencia conjunta de bosques y agua 2018*. DOI: 10.13140/RG.2.2.18644.65921
- Gupta, R. S. (2016). Hydrology and hydraulic systems. *Waveland Press*. ISBN: 978-1-4786-3091-3
- Global Forest Watch (2020). “¿Crecerá la Industria Aguacatera a Expensas de los Bosques Mexicanos?”. Página Web. Disponible en: <https://n9.cl/7xb31> [Consultado 05- 02- 2023]
- Hernández Aguilar, E. F. (2018). “Variación altitudinal de variables meteorológicas en el municipio de Zitácuaro, Michoacán: Implicaciones para los usos del suelo agrícolas”. *Tesis Maestría*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.
- Hernández-Aguilar, E.F., Ramírez, M.I. (EN PRENSA). “Los usos de suelo agrícolas y la aptitud climática del cultivo de aguacate en Zitácuaro, Michoacán, México”. En: Gómez-

Mendoza, L. y Reyes González, E.R (Coords). *Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca: clima, fenología vegetal y conservación*. Bonilla y Artigas-UNAM.

Honey-Rosés, J., Baylis, K., & Ramírez, MI. (2011). "A Spatially explicit estimate of avoided forest loss". *Conservation Biology*, 25(5), pp. 1032-1043. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2011.01729.x

Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., & Raphael, N. I. (2017). Accuracy assessment and comparative analysis of IDW, spline and kriging in spatial interpolation of landform (topography): an experimental study. *Journal of Geographic Information System*, 9(3), 354-371. DOI: 10.4236/jgis.2017.93022

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2000). "Conjunto de datos vectoriales de información topográfica". Cartas topográficas E14A25, E14A26, E14A35, y E14A36, Escala 1:50000. México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014). "Conjunto de datos vectoriales edafológico", escala 1:250000 Serie II. Escala 1:250 000 Serie II. México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2016). "Conjuntos de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación". Escala 1:250 000 Serie VI. México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020). "Cuéntame – Número de habitantes por municipio". Página Web. Disponible en: <https://n9.cl/9jxc5> [Consultado 22- 12-2018]

ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2014). "Decenio Internacional para la Acción 'El agua fuente de vida' 2005-2015. Página Web. Disponible en: https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml

- Koncagül, E. (2015). Facing the challenges: case studies and indicators: UNESCO's contributions to the United Nations world water development report 2015 (Vol. 2). *UNESCO Publishing*.
- Loveland, T. R., & Defries, R. S. (2004). Observing and monitoring land use and land cover change. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 153, 231-246. DOI:10.1029/153GM18
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 28(5), 823-870. DOI: 10.1080/01431160600746456
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 25(12), 2365-2401. DOI: 10.1080/0143116031000139863
- Martín Clemente, C. R., Sosa Ramírez, J., Maass Moreno, M., Luna Ruíz, J. D. J., Meráz Jiménez, A. D. J., & Flores Ancira, E. (2015). Comparación de métodos para estimar disponibilidad hídrica en cuencas forestales. *Terra latinoamericana*, 33(1), 17-26.
- Mas, J. F., Lemoine-Rodríguez, R., González, R., López-Sánchez, J. G., Piña-Garduño, A., & Herrera-Flores, E. (2017). "Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT". *Madera Bosques*, 23(2), 119–131. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321472>
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., ... & Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multidecade spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.

- Mas, J.F., & Ramirez, I. (1996). Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. *ITC Journal*, 3/4, 278–283. ISSN: 0303-2434
- Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49), 92-117.
- Merlo Reyes, A. E. (2018). “Calidad del agua y usos del suelo en microcuencas del oriente de Michoacán”. *Tesis Maestría*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.
- Meyer, W. B., & BL Turner, I. I. (Eds.). (1994). Changes in land use and land cover: a global perspective (Vol. 4). *Cambridge University Press*. ISBN: 0-521-4708-4
- Meyer, W. B., & Turner, B. L. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual review of ecology and systematics*, 23(1), 39-61. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000351>
- Morales, L. M. & Cuevas, G. (2012). “Inventario 2011 y evaluación del impacto ambiental forestal del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán”. *Informe Ejecutivo*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Morelia, Michoacán. p10.
- Navarrete, JL., Ramírez, MI., & Pérez-Salicrup, D. (2011). “Logging within protected areas: Spatial evaluation of monarch butterfly biosphere reserve, Mexico”. *Forest Ecology and Management*, 264(4), pp.646-654. doi: 10.1016/j.foreco.2011.04.033
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 1068-1072. DOI: 10.1126/science.112884

Olivares-Martinez, L. D., Gomez-Tagle, A., & Pérez-Salicrup, D. R. (2023). Regional Drivers behind the Burning of Remanent Forests in Michoacán Avocado Belt, Central Mexico. *Fire*, 6(3), 81. <https://doi.org/10.3390/fire6030081>

Our World in Data (2019). "Agricultural water as a share of total water withdrawals, 2019". Página Web. Disponible en: <https://n9.cl/uwmwu> [Consultado 28- 12-2023]

Palacio Prieto, J., & González, L.L. (1994). Clasificación espectral automática vs clasificación visual: Un ejemplo al sur de la ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, 29, 25–40. ISSN 0188-4611

Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, ecosystems & environment*, 101(2-3), 251-268. DOI: 10.1016/j.agee.2003.09.008

QGIS Development Team. (2020). QGIS Geographic Information System [Software de cómputo]. Recuperado de [http:// www.qgis.org/](http://www.qgis.org/)

R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Radoux, J., & Bogaert, P. (2014). Accounting for the area of polygon sampling units for the prediction of primary accuracy assessment indices. *Remote sensing of environment*, 142, 9-19. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.030

Radoux, J., & Defourny, P. (2010). Automated image-to-map discrepancy detection using iterative trimming. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(2), 173-181. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.2.173>

- Radoux, J., Lamarche, C., Van Bogaert, E., Bontemps, S., Brockmann, C., & Defourny, P. (2014). Automated training sample extraction for global land cover mapping. *Remote Sensing*, 6(5), 3965-3987. <https://doi.org/10.3390/rs6053965>
- Ramírez, M. I., (2001). “Los espacios forestales de la sierra de Angangueo (estados de michoacán y México), México: una revisión geográfica”. *Tesis de doctorado*. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid.
- Ramírez, M. I., & Zubieta, R. (2005). “Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca”. Reporte Técnico. *Instituto de Geografía and World Wildlife Foundation*.
- Ramírez, M. I., López-Sánchez, J. G., Barrasa, S. (2019). “Mapa de vegetación y cubiertas del suelo, 2018. Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Serie Cartográfica Monarca, Volumen II”. *CIGA-UNAM*. Morelia, México.
- Ramírez, M. I., Miranda, R., Zubieta, R., & Jiménez, M. (2006). “Land Cover and Road Network Map for the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico, 2003”. *Journal of Maps*. 3. 181-190. DOI: 10.1080/jom.2007.9710837
- Ramírez, M. I., Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G., & Salas-Canela, L. (2015). “Threats to the availability of overwintering habitat in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve: land use and climate change”. En Oberhauser, K. S., Nail, K. R., & Altizer, S. (eds.) *Monarch in a changing World. Biology and conservation of an iconic butterfly*. Nueva York, p. 312. DOI: 10.1073/pnas.0703993104
- Rocha-Arroyo, J. L., Salazar-García, S., Bárcenas-Ortega, A. E., González-Durán, I. J., & Cossio-Vargas, L. E. (2011). Fenología del aguacate 'Hass' en Michoacán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(3), 303-316.

- Ruelland, D., Tribotte, A., Puech, C., & Dieulin, C. (2011). Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(6), 1747–1777. DOI: 10.1080/01431161003623433
- Ruíz-Sevilla, G. & Ortiz-Paniagua C. F. (2021). “Implicaciones de la Producción de Aguacate en el Balance Hídrico desde una Perspectiva de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), 2011-2019”. *Cimexus*, 16(2), 11-35.
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2020). Creció casi 20 % superávit de la balanza agroalimentaria de México con el mundo en enero 2020. Página WEB. Disponible en: <https://n9.cl/vp9f3s> [Consultado 23-03-2021]
- Sader, S.A., Stone, T.A., & Joyce, A.T. (1990). Remote sensing of tropical forests: An overview of research and applications using non-photographic sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(10), 1343–1351.
- Sánchez Espejo, M del M. (2018). “The implication of the avocado trade for Global water scarcity”. *Tesis Maestría*. School of water, Energy and Environment. CRANFIELD University.
- Saunders, S. P., Ries, L., Neupane, N., Ramírez, M. I., García-Serrano, E., Rendón-Salinas, E., & Zipkin, E. F. (2019). Multiscale seasonal factors drive the size of winter monarch colonies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(17), 8609-8614.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2020a). “Avance de Siembras y Cosechas. Resumen nacional por estado”. Disponible en <https://n9.cl/1asz7> [Consultado 01-05-2020]

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2020b). “Cierre de producción agrícola. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola”. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> [Consultado 01-05-2020]
- Thomas, D. S., & Goudie, A. S. (Eds.). (2009). The dictionary of physical geography. *John Wiley & Sons*. ISBN: 978-0-631-20473-2
- Thorntwaite, C. W. 1955. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.
- UN (United Nations) (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. *UNESCO*, Paris [Consultado 04-03-2021]
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2023). “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua”. *UNESCO*, París. ISBN 978-92-3-300212-8
- Van Den Broek, A.C., Smith, A.J.E., & Toet, A. (2004). Land use classification of polarimetric SAR data by visual interpretation and comparison with an automatic procedure. *International Journal of Remote Sensing*, 25(18), 3573–3591. DOI: 10.1080/01431160310001654400
- Vidal, O., López-García, J., & Rendón-Salinas, E. (2014). “Trends in deforestation and forest degradation after a decade of monitoring in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico”. *Conservation Biology*, 28(1), pp. 177-186. DOI: 10.1111/cobi.12138
- WWAP (World Water Assessment Programme) (2012). The United Nations World Water Development Report 4: Managing water under uncertainty and risk. Paris. *UNESCO*. Disponible en: <https://n9.cl/il5wa> [Consultado 06-04-2020]

WWAP (World Water Assessment Programme) (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris. *UNESCO*. Disponible en: <https://n9.cl/n9vhw> [Consultado 02-04-2020]

Zhou, W., Cadenasso, M.L., Schwarz, K., & Pickett, S.T. (2014). Quantifying spatial heterogeneity in urban landscapes: Integrating visual interpretation and object-based classification. *Remote Sensing*, 6, 3369–3386. DOI: 10.3390/rs6043369

ANEXOS

Anexo 1. Balance hídrico mensual desglosado por microcuenca (mm)

Senguio

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	20	13	10	14	73	138	202	196	143	68	14	10	900
Etp	41	41	58	70	84	77	64	62	58	54	46	41	697
Etr	30	23	22	23	73	77	64	62	58	54	41	29	556
D	11	18	36	47	10	0	0	0	0	1	5	12	140
S	0	0	0	0	0	0	111	134	85	15	0	0	344

Irimbo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	16	6	19	14	69	184	213	211	141	71	26	10	981
Etp	41	42	58	70	84	81	69	67	62	59	49	42	724
Etr	29	19	29	23	70	81	69	67	62	58	47	32	585
D	13	22	29	47	14	0	0	0	0	1	3	10	139
S	0	0	0	0	0	0	159	144	79	13	0	0	396

Turundeo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	20	10	9	18	57	209	239	247	145	78	18	13	1062
Etp	45	45	61	75	90	86	74	73	68	63	53	46	778
Etr	31	22	20	25	60	86	74	73	68	63	48	32	602
D	14	23	41	49	30	0	0	0	0	0	6	13	176
S	0	0	0	0	0	0	194	174	77	15	0	0	460

Ocampo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	15	11	15	10	46	187	217	225	213	94	27	7	1066
Etp	39	39	54	65	77	72	61	61	57	54	46	40	665
Etr	27	22	27	20	49	72	61	61	57	54	44	30	525
D	11	17	27	44	28	0	0	0	0	0	2	10	140
S	0	0	0	0	0	0	181	164	156	40	0	0	541

Tuxpan

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	20	11	9	16	46	152	176	167	140	73	18	6	837
Etp	46	45	63	76	91	87	75	74	69	64	55	47	793
Etr	31	21	20	23	49	87	75	74	69	63	49	30	590
D	15	24	43	53	43	0	0	0	0	1	6	18	204
S	0	0	0	0	0	0	71	94	72	10	0	0	247

Cerrito Colorado

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	27	21	6	11	49	190	227	217	135	74	17	52	1027
Etp	44	42	59	71	85	82	71	69	65	60	52	45	744
Etr	38	33	28	25	55	82	71	69	64	60	46	42	614
D	1	5	25	42	29	0	0	0	0	0	35	7	145
S	0	0	0	0	0	0	181	148	71	14	0	14	428

San Felipe

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	31	34	8	10	30	196	192	196	206	88	18	3	1014
Etp	46	46	63	76	89	81	69	67	63	59	53	46	757
Etr	37	37	24	20	35	81	69	67	63	58	47	28	567
D	8	9	39	55	54	0	0	0	0	1	6	18	190
S	0	1	0	0	0	0	145	129	143	30	0	0	447

Jungapeo

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	25	12	7	8	39	140	169	144	133	59	15	44	795
Etp	54	55	73	88	102	94	79	78	75	71	63	55	888
Etr	40	28	22	16	42	94	79	78	75	55	53	42	625
D	4	17	43	66	57	0	0	0	0	16	48	24	276
S	0	0	0	0	0	0	42	66	58	4	0	13	183

San Juan Zitacuaro 1

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	22	24	17	9	71	196	199	191	171	103	52	7	1061
Etp	42	43	58	69	79	70	59	58	55	53	47	42	674
Etr	36	33	34	24	68	70	59	58	55	53	47	37	574
D	7	11	24	45	10	0	0	0	0	0	6	5	109
S	0	1	0	0	4	0	182	133	116	51	11	0	496

San Juan Zitacuaro 2

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	25	43	17	8	72	223	218	205	173	112	42	6	1146
Etp	43	44	60	73	83	74	62	60	56	54	49	43	703
Etr	37	42	35	25	70	74	62	60	56	54	47	35	598
D	7	2	23	47	13	0	0	0	0	0	12	6	110
S	0	1	0	0	3	0	224	145	117	58	6	0	553

Ocurio

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	24	5	12	9	37	150	185	152	168	62	13	51	869
Etp	55	55	76	91	107	97	81	79	74	71	63	55	904
Etr	42	23	24	17	40	97	81	79	74	59	52	46	635
D	5	22	43	68	64	0	0	0	0	12	50	19	283
S	0	0	0	0	0	0	64	73	94	3	0	15	249

La Encarnación

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	22	15	12	8	52	179	211	197	176	87	18	21	1000
Etp	50	50	69	83	98	87	72	70	66	63	57	50	815
Etr	35	26	24	17	55	87	72	70	66	59	50	37	597
D	4	14	34	59	40	0	0	0	0	4	38	32	225
S	0	0	0	0	0	0	142	127	111	28	0	2	409

Aputzio de Juárez

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	anual
Pp	7	2	9	7	75	182	236	230	191	119	25	29	1112
Etp	51	51	70	84	98	87	73	71	66	64	57	51	823
Etr	28	17	20	14	76	87	73	71	66	64	52	42	611
D	23	34	50	70	23	0	0	0	0	0	5	8	212
S	0	0	0	0	0	0	162	159	125	55	0	0	501

Anexo 2. Gráficos balance hídrico mensual por microcuenca

