



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

Detección de cambio de coberturas de suelo en el estado de Yucatán y su relación con el programa federal “Sembrando Vida”.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

Gloria Itzel Avila Vasquez

ASESOR DE TESIS:

Dr. José Mauricio Galeana Pizaña

Ciudad Universitaria, CD. MX.

2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



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

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme conocimiento y forjarme profesionalmente desde mi ingreso a la preparatoria hasta la licenciatura, por permitirme conocer personas increíbles y ver el mundo con otros ojos, nunca dejaré de sentirme orgullosa de pertenecer a una de las mejores universidades del mundo.

A mi madre, el amor más bonito de mi vida, la mujer que vive su vida a través de la mía y que siempre quiere lo mejor para sus hijos, mis logros también son tuyos. A mi papá, que siempre me consintió desde pequeña. A Luz, la mejor hermana que la vida me pudo dar, gracias por hacerme sentir fuerte, libre y querida. A mi hermano, nunca te lo digo, pero te quiero y te agradezco. A mi Lucas por acompañarme siempre, te buscaré en mi otra vida.

A mis amigos de la secundaria, principalmente Javier, Diana y Gabi tantos años de amistad, nos hemos visto concluir la carrera, encontrar nuestros primeros trabajos, llorar y principalmente reír, gracias por ser mi segunda familia.

A mis amigas que conocí en cada año de la prepa Pao, Dany Sotelo, Are, Chayito, Tere, Diana, Aket, Mily, Bere, mujeres que admiro, me siento tan querida cuando las veo.

A mis amigos de la universidad Joann, Lanceloth, Rosy por compartirme su conocimiento y acompañarme en este camino; Jenni, Dani e Irina porque con ustedes la carrera fue más divertida.

A mi asesor Dr. Mauricio Galeana por tu tiempo, paciencia y experiencia, gracias por asesorarme, por aclarar mis ideas y darme libertad, te admiro profesionalmente desde la primera clase que tomé contigo. A los integrantes del sínodo, Mtro. José Manuel Espinoza, Mtro. José Luis Hernández, Dra. Rocío Alanís y Mtra. Flavia Tudela por su tiempo para leer mi trabajo y mejorarlo.

A cada una de las personas mencionadas y a otras más que llevo en mi corazón, muchas gracias porque de cada una aprendí algo que me trajo hasta este día.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Posicionamientos teóricos-conceptuales	7
1.1. Uso de suelo y cobertura de suelo.....	7
1.2. Cambio de uso y cobertura de suelo	8
1.3. Procesos formadores del cambio de uso de suelo.....	10
1.4. Percepción remota.....	11
1.5. Imágenes satelitales	13
1.6. Detección de cambios	16
1.7. Umbralización.....	19
1.8. Sembrando Vida.....	23
1.8.1. Objetivos	27
1.8.2. Lineamientos	27
1.9. Sistemas socio-ecológicos.....	30
Capítulo 2. Caracterización de la zona de estudio	35
2.1. Localización.....	35
2.2. Contexto físico.....	36
2.2.1. Geología.....	37
2.2.2. Relieve	38
2.2.3. Edafología	42
2.2.4. Climatología	45
2.2.5. Hidrología	48
2.2.6. Vegetación	51
2.3. Contexto socioeconómico.....	52
2.3.1. Población y localidades participantes	53
2.3.2. Actividad económica.....	56
Capítulo 3. Metodología	58
3.1. Descarga	60
3.2. Correcciones	62
3.2.1. Calibración radiométrica	64
3.2.2. Corrección atmosférica.....	67
3.2.3. Reflectancia normalizada.....	70
3.3. Procesamiento de imágenes satelitales con Image Change Workflow (ICW) ..	72

3.4. Global Forest Watch (GFW)	77
3.5. Cruce de información.....	79
Capítulo 4. Resultados y discusión	82
4.1. Resultados	82
4.2. Discusión.....	89
Conclusiones	95
Referencias	98

Introducción

Los estudios relacionados a los cambios de uso de suelo y vegetación (CUSV) han adquirido importancia en los últimos años debido al impacto que tiene sobre los ecosistemas, la configuración del paisaje y el bienestar humano, además de causar pérdidas en la biodiversidad. Dichos procesos de cambios en la cobertura vegetal o uso del suelo ocurren en una dinámica donde intervienen diversos factores sociales y naturales, por lo que su estudio se vuelve complejo.

Debido a la gran diversidad en vegetación que tiene nuestro país es considerado como megadiverso, sin embargo, también sufre importantes cambios y pérdidas principalmente por actividades humanas como la agricultura. Es así como “la principal causa de deforestación es el cambio de uso del suelo para convertir los bosques y selvas tropicales en potreros o campos de cultivo” (Meli, 2003, citado por Leija **et al.**, 2016), es decir “ocurre simultáneamente una pérdida de cobertura vegetal sobre la tierra y un cambio en su uso” (Leija **et al.**, 2016, p.126).

Cada año en México se deforestan en promedio 155 000 ha y 354 000 ha, conservando solo el 32% de su cobertura forestal original (FAO, 2010, citado por Leija **et al.**, 2016), por esta razón, los cambios en los usos de suelo y vegetación (CUSV) han generado un mayor interés en la investigación ambiental. Los cambios y pérdidas constantes en las coberturas deben ser un problema de interés continuo y atacado desde distintos sectores por las consecuencias que tienen sobre la biodiversidad y el bienestar humano. El estudio de los

CUSV debe ser de manera interdisciplinar, comprendiendo cómo interactúan los diversos factores socioeconómicos y biofísicos que se encuentran en el territorio (Pineda **et al**, 2011, citado por Camacho **et al**, 2017).

Existen diferentes programas gubernamentales e instrumentos de política ambiental para frenar y combatir los problemas entorno a los CUSV, por ejemplo, reforestar zonas de bosque y selva que se pierden, frenar la expansión de la frontera agrícola a través de mecanismos de conservación, monitoreo y mapeo de las coberturas de suelo. Respecto al monitoreo de las coberturas terrestres “es un tema de suma importancia en los ámbitos gubernamental, académico y social por las implicaciones que tienen los cambios de las coberturas y usos de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad y servicios ambientales” (García y Mas, 2008, p.8).

Los programas gubernamentales a cualquier escala enfocados a los USV deben ser eficientes, con el objetivo de conservar en óptimas condiciones los ambientes que actualmente están ocupados con bosques, cuerpos de agua y otras asociaciones de vegetación natural, “pues de no aplicar, las que son para el manejo sustentable de los recursos naturales, los territorios estarán sujetos a presiones ambientales que provocarán impactos asociados con el cambio climático y a las condiciones de vida de los habitantes de las zonas rurales y urbanas” (López **et al**, 2014, p.137).

El interés que el medio ambiente ha generado en las agendas políticas es reciente (Castro, 2016), en el caso de México existen diversos documentos legales dirigidos al tema

ambiental, leyes, reglamentos, normas, decretos y acuerdos; en el marco normativo se tiene la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA); cuenta con instituciones como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); dentro de los Planes de Desarrollo se encuentran programas dirigidos a la conservación del medio ambiente; las áreas naturales protegidas (ANP) o unidades de manejo para la conservación de la vida silvestre (UMAs) funcionan como instrumentos de gestión (Carton, 2012). En la actualidad las políticas públicas dirigidas a la conservación y manejo de la biodiversidad en las zonas rurales de México cuentan con una serie de instrumentos regulatorios de actuación territorial (Álvarez y Muñoz, 2008).

Las políticas agropecuarias son mecanismos enfocados al sostenimiento de la producción y establecimiento de estrategias que vinculen la producción tradicional y la agricultura del mercado (Cacho, 2016), además de asegurar beneficios a los productores agrícolas, sin embargo, estas políticas han sido deficientes o incompletas. Uno de los ejemplos en México fue PROCAMPO (actualmente Producción para el Bienestar), el cual en su momento incrementó disfuncionalidades en el sector rural beneficiando a los productores más capaces y dejando fuera a los pequeños productores, lo contrario al programa Producción para el Bienestar el cual busca impulsarlos. Aunado a lo anterior, las políticas implementadas hasta el momento ignoran los problemas que causan sobre la naturaleza ya que el ambiente no ha sido incorporado en las políticas de desarrollo rural (Carabias, 1990, citado por Gil y Vivar, 2015).

El programa “Sembrando Vida” está dirigido a zonas rurales ya que cuentan con un alto potencial agroalimentario, pero que a su vez han sufrido un importante proceso de deforestación y sobreexplotación de sus recursos, sin embargo, el programa tiene claro que pueden convertirse en un sector estratégico para el desarrollo del campo si se trabaja bajo un enfoque de sustentabilidad. Los sujetos agrarios (como se le conoce a la población objetivo dentro de los términos y condiciones del programa Sembrando Vida), representan una gran oportunidad para impulsar la producción de cultivos mediante sistemas agrícolas sustentables que contribuyan no solo a mejorar la alimentación y calidad de vida de las personas, sino también a la recuperación de suelos y a la mejora del medio ambiente; el programa busca atender a la población rural que se encuentra en las regiones de más alta biodiversidad del país, mejorando los ingresos de los pobladores y recuperando la cobertura forestal de un millón de hectáreas en el país (DOF, 2019).

Es así como surge el interés en realizar este trabajo, para encontrar relación entre la implementación de un programa federal como Sembrando Vida y el cambio en las coberturas de suelo en el estado de Yucatán.

“En el ámbito de los estudios territoriales, la percepción remota (PR) y los sistemas de información geográfica (SIG), al ser capaces de obtener datos de manera ágil y a bajo costo, se han convertido en tecnologías fundamentales” (García y Mas, 2008, p.8) en distintas investigaciones por ejemplo, en la evaluación de los CUSV ya que permiten el monitoreo de coberturas vegetales, es por ello la importancia de realizar el presente trabajo ya que

permitirá conocer el estado de la vegetación en la entidad desde la implementación del programa, de no realizarse se desconocería si el programa está cumpliendo de manera positiva con su objetivo.

Se piensa que este programa ayudará al bienestar económico de los campesinos (recibiendo un apoyo económico mensual de \$5,000.00) y al mismo tiempo a la conservación de vegetación que pudiera ser deforestada para la agricultura. En el desarrollo del trabajo se dará cuenta si Sembrando Vida ha cumplido su objetivo o, por el contrario, ha incentivado de forma negativa los cambios en la vegetación y usos del suelo de la entidad, con el fin de que los sujetos agrarios puedan ser parte de la población objetivo.

En el presente trabajo, la hipótesis que se buscará comprobar es la siguiente: la implementación del programa Sembrando Vida está generando cambios en las coberturas de suelo, así como deforestación; ya que las personas interesadas al contar con tierras suficientes para ingresar al programa, pero que cuentan con una cobertura vegetal distinta a la requerida, se ven en la necesidad de modificar la vegetación para ser consideradas.

El objetivo general de esta investigación es evaluar, a través de técnicas de segmentación de imágenes como la umbralización, la identificación de cambios de coberturas de suelo en territorios apoyados por el programa Sembrando Vida en Yucatán. Para su realización, se cuenta con una serie de objetivos particulares:

- Análisis y alcance del programa Sembrando Vida

- Caracterización del área de estudio
- Recopilación de insumos y productos a utilizar
- Análisis e implementación de métodos de detección de cambios
- Evaluación de los cambios de uso de suelo y vegetación en localidades donde existen beneficiarios del programa
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos

Capítulo 1. Posicionamientos teóricos-conceptuales

1.1. Uso de suelo y cobertura de suelo

Sabemos que en el suelo crece vegetación y se desarrollan actividades, es así como se lleva a pensar en una clasificación del uso que tiene el suelo. En la literatura se puede encontrar dos principales conceptos: el uso de suelo (land use en inglés) y la cobertura del suelo (land cover en inglés).

El *uso de suelo* es definido por la National Research Council (2014) como la actividad humana llevada a cabo en la superficie de la tierra por ejemplo un parque, asentamientos humanos, cultivos. La definición de Ryan (2013) hace referencia al propósito que tiene el suelo por ejemplo recreación, así un uso recreativo puede ocurrir en un bosque o en un pastizal. La mayoría de las definiciones sobre el uso de suelo coinciden en atribuir este concepto a procesos socioeconómicos, es decir, los usos de suelo de un territorio dependen principalmente, de las actividades humanas y económicas de este, así como de factores ambientales entre ellos vegetación, clima, topografía (Hernández, 2019). El uso de suelo se expresa como la actividad socioeconómica que se desenvuelve sobre determinado territorio y como consecuencia se obtiene el cambio de la cobertura original de dicho territorio (Rosete Vergés, 2008, citado por Ángeles, 2019).

Entendemos que el uso de suelo es la actividad que se desarrolla sobre un territorio, mientras que la *cobertura del suelo* es definida por la National Research Council (2014) como las cualidades biofísicas de la superficie de la tierra por ejemplo vegetación, agua,

suelo desnudo, suelos impermeables. González (2016) habla de una diferencia entre cubierta y cobertura, la primera la define como el material o elemento que cubre el suelo y se refiere a la naturaleza o forma física de la superficie del terreno, mientras que la cobertura la relaciona con la vegetación y es el porcentaje del área que cubre en la superficie del suelo un tipo de vegetación particular. Ellis (2007) define de manera concreta a la cobertura de suelo como la cobertura física y biológica de la superficie del suelo. Di Gregorio (2016) dice que la cobertura del suelo es un reflejo de la ocupación de la Tierra por sistemas naturales o modificados, además de ser un indicador de la intervención humana en ella. De acuerdo con las definiciones anteriores, la cobertura de suelo es un concepto enfocado a los elementos físicos que se distribuyen en un territorio, por ejemplo, un bosque, pastizal natural o inducido, cuerpos de agua, entre otros.

1.2. Cambio de uso y cobertura de suelo

El cambio en el uso/cobertura de suelo (land use/cover change en inglés) es uno de los temas de mayor interés al ser uno de los principales factores en el cambio climático global y en la pérdida de la biodiversidad a nivel mundial. “En México cerca de la mitad del territorio ha sido modificado intensamente” (SEMARNAT, 2002, p.32), se habla de una tasa de deforestación de 127,770 ha por año entre el 2015 y 2020 según el marco de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA por sus siglas en inglés) de la FAO (CONAFOR, 2020). “Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de distintos procesos asociados con la deforestación, la

degradación y la perturbación de los bosques, erosión y desertificación del suelo, pérdida de la biodiversidad” (Lambin **et al.**, 2001, citado por Camacho **et al.**, 2015, p.94).

Las definiciones en el apartado anterior sobre uso y cobertura del suelo nos sugieren comprender las relaciones humanas que se desarrollan en determinado territorio para el estudio de los usos y coberturas del suelo. Asimismo, entender la definición de cambios de uso y/o coberturas de suelo conlleva a identificar la importancia de la intervención humana en el desarrollo de estos.

El *cambio de uso de suelo* es definido por la National Research Council (2014) como un cambio en las características de la superficie terrestre que generalmente son causadas por la acción humana, generando consecuencias en el funcionamiento del sistema ambiental. “El cambio de cobertura vegetal y de uso del suelo es, en mayor medida, consecuencia de las interacciones entre las actividades humanas con el medio natural” (Berlanga **et al.**, 2010, p.8). Podemos encontrar una definición más simple sobre el cambio de uso de suelo en Lee (2018) el cual se refiere a la conversión del uso de una porción de tierra por parte de los humanos, de un propósito a otro. Por ejemplo, la tierra puede convertirse de tierras de cultivo a pastizal inducido, o de vegetación primaria a usos de tierra específicos, por ejemplo, plantaciones de aceite de palma. Los cambios en la cobertura del suelo se refieren a un proceso dinámico que incluye tanto la conversión como la modificación de la vegetación. Las conversiones de vegetación siempre ocurren de forma repentina, y generalmente están relacionadas con cambios en el tipo de cobertura del suelo que son

causadas, por ejemplo, por la deforestación, la urbanización y la recuperación de tierras (Lili **et al**, 2016).

Al realizar una búsqueda de definiciones sobre el cambio de uso o cobertura de suelo, existe un mayor número relacionadas al primero, se realiza más investigación en torno a este concepto que al de cobertura. En este trabajo definimos al cambio de cobertura de suelo como un proceso de modificación o conversión en las coberturas del suelo de un territorio, por ejemplo, de bosque primario a secundario, o de selva a pastizal inducido, por mencionar algunos ejemplos.

1.3. Procesos formadores del cambio de uso de suelo

La deforestación, alteración o degradación, así como la fragmentación son algunos de los procesos que dan origen al concepto de cambios de uso de suelo y vegetación, es decir, estos procesos son clasificados como CUSV.

- *Deforestación* (Deforestation en inglés). Cambio permanente de una cubierta dominada por árboles hacia una que carece de ellos (SEMARNAT, 2015). La deforestación es la conversión de áreas boscosas a usos de tierras no forestales, como tierras de cultivo, uso urbano, área talada o sin vegetación. Según la FAO, la deforestación es la conversión del bosque a otro uso de la tierra o, la reducción a largo plazo de la cubierta de copas de los árboles por debajo del umbral del 10% (Giri, 2007).
- *Alteración o degradación* (disturbance/degradation en inglés). Modificación inducida por los humanos en la vegetación natural, pero no un reemplazo total de la misma

(SEMARNAT, 2015). La degradación es un proceso que conduce a un deterioro temporal o permanente de la densidad o estructura de la cubierta vegetal o de la composición de las especies. En un sentido más general, la degradación forestal es la reducción a largo plazo del suministro potencial general de beneficios de la vegetación, que incluye madera, biodiversidad y cualquier otro producto o servicio (Giri, 2007).

- *Fragmentación* (fragmentation en inglés). Transformación del paisaje en parches pequeños de vegetación original rodeados de superficie alterada (SEMARNAT, 2015). La fragmentación sucede cuando la vegetación original de una zona es retirada, con frecuencia quedan pequeños manchones intactos inmersos en áreas sumamente degradadas (SEMARNAT, 2002).

“Las actividades humanas tienen distintos efectos en la degradación ambiental, debido a que los usos de suelo son diversos y varían en intensidad, duración y extensión. Por lo tanto, la identificación y análisis de los cambios de uso de suelo como factor ecológico y geográfico son fundamentales para entender cómo, dónde y qué tanto se están perdiendo los recursos naturales” (Galicia **et al**, 2007, p.51).

1.4. Percepción remota

El empleo de la percepción remota ha adquirido un papel importante en el estudio de la superficie terrestre, por lo que existen distintas definiciones sobre ella. La *percepción remota* o *teledetección* (remote sensing en inglés), es definida por algunos autores (Lira 1995, Chuvieco, 2015) como una técnica, mientras que otros la consideran una ciencia

(Lillesand **et al.**, 2015), no obstante, se debe resaltar la importancia que ha adquirido con el tiempo en los estudios ambientales.

Chuvieco (2015) define a la teledetección como una técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre, asimismo, considera que no solo son procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación. De forma amplia Khorram y colaboradores (2012), definen a la percepción remota como la adquisición y medición de información de fenómenos, objetos o materiales por un dispositivo de grabación que no está en contacto físico con el objeto de estudio. En un contexto ambiental, la teledetección generalmente se refiere a tecnologías para registrar la energía electromagnética que emana de áreas u objetos en la superficie terrestre, los océanos o la atmósfera de la Tierra (Short 2010, citado por Khorram **et al.**, 2012). Siguiendo en la corriente física, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), define a la percepción remota como el proceso de detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo su radiación reflejada y emitida a distancia. Una definición concreta sobre teledetección la podemos encontrar en National Oceanic and Atmospheric Administration (2018), como la ciencia de obtener información sobre objetos o áreas a distancia. Por lo anterior, la PR es la técnica que permite obtener y procesar información de áreas u objetos de la superficie terrestre sin estar en contacto directo con estos.

Los avances en PR o teledetección han cambiado conforme al desarrollo tecnológico de cada momento, es decir, ha pasado de adquirir fotografías de la superficie terrestre mediante un globo cautivo (Chuvieco, 2015) a obtener información de la Tierra mediante satélites artificiales como la misión LANDSAT (Figura 1.1).

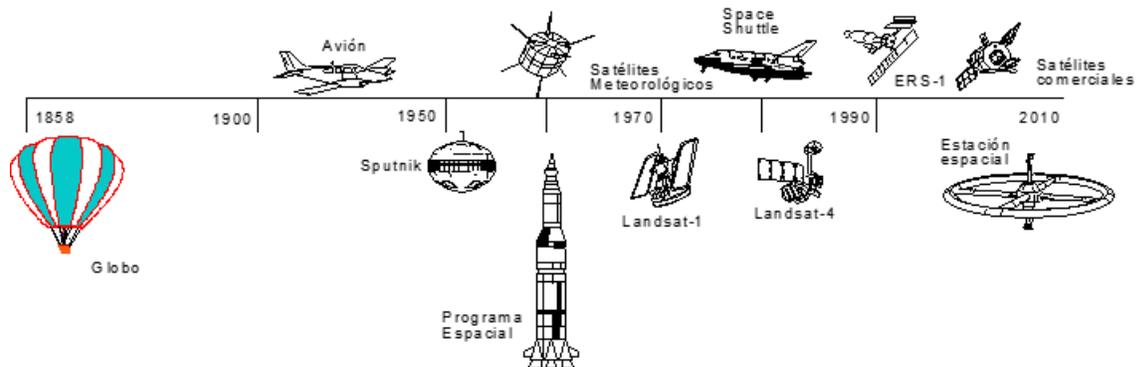


Figura 1.1. Evolución histórica de los sistemas de teledetección. Fuente: Chuvieco (2015).

1.5. Imágenes satelitales

La percepción remota es una herramienta que ha adquirido un auge importante en los años recientes, para el estudio de las actividades humanas, así como de los procesos naturales que se desarrollan en nuestro planeta. El uso de productos satelitales en distintos estudios como los ambientales, se ha visto beneficiado gracias al desarrollo tecnológico que ha permitido contar actualmente con imágenes satelitales a gran detalle, Chuvieco (2015) destaca que el nivel de aplicabilidad de la teledetección va a la par con la tecnología de la época.

Los primeros registros de obtención de datos satelitales se remontan al año 1859 con el trabajo de Gaspar Felix de Tournachon, el cual obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo aerostático, esto dio paso a otros personajes como James Wallace a realizar lo mismo. Aproximadamente cincuenta años después se obtuvo la primera fotografía aérea desde un avión gracias al trabajo de Wilbur Wright, este hecho marcó el camino de la observación aérea desde plataformas remotas.

Actualmente las aplicaciones de la percepción remota son variadas, sin embargo, una de las primeras y que permitió un desarrollo notable fueron los conflictos bélicos de la Segunda Guerra Mundial. Este hecho histórico impulsó el mejoramiento de las cámaras de reconocimiento, la introducción de sensores como el radar, así como de los sensores térmicos. El lanzamiento del primer satélite llamado Sputnik en 1957 permitió una mayor exploración de nuestro planeta, así como del espacio. Poco después, la NASA abrió paso a las primeras observaciones y estudios meteorológicos con el lanzamiento del satélite TIROS en 1960.

La forma de observar y estudiar nuestro planeta ha evolucionado gracias a distintos sucesos históricos como se describieron anteriormente, sin duda cada uno de los instrumentos de observación aportaron información relevante y marcaron el rumbo de la percepción remota. Pero como lo mencionan distintos autores, la culminación de esta técnica se dio con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (Earth Resources Technology Satellite) en 1972 posteriormente llamado Landsat (Chuvieco, 2015) con el

segundo lanzamiento, este satélite fue uno de los más importantes en la historia de la teledetección ya que sería el primer programa en proveer el archivo global continuo más largo de datos satelitales que se han recopilado con la misma resolución espacial y con bandas espectrales similares (Potapov **et al.**, 2020), diseñado para la observación terrestre.

Al primer lanzamiento del programa Landsat se sumaron más satélites con mejoras en la calidad de la imagen hasta la actualidad (Figura 1.2), este programa se ha posicionado como el recurso mayormente utilizado debido a su antigüedad en el mercado y por los datos que provee. Hasta el momento se han lanzado 9 satélites Landsat de los cuales Landsat-5 tuvo el mayor tiempo de funcionamiento, mientras que Landsat-6 no logró estar en órbita.

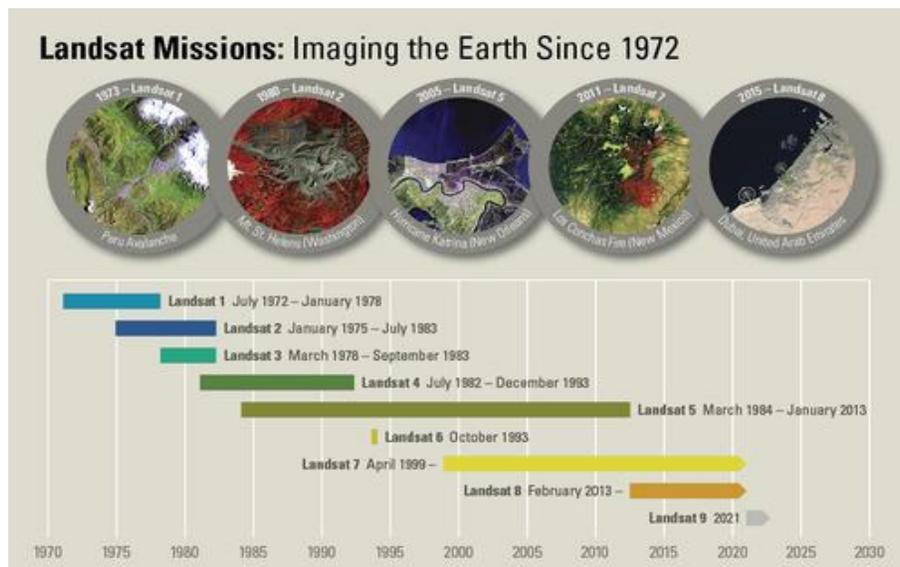


Figura 1.2. Cronología de las misiones Landsat. Fuente: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>.

Las características de los sensores fueron mejorando en cada satélite proporcionando imágenes satelitales con mejores resoluciones, por ejemplo, los tres primeros satélites tenían una resolución temporal de 18 m mientras que los siguientes satélites tienen un

tiempo de revisita de 15 días. Respecto a la resolución espacial hubo un avance significativo ya que hasta el lanzamiento del Landsat-4 era de 80x80 m, a partir del Landsat-5 los productos pasaron a ser de 30x30m lo que ofreció un mayor detalle de los objetos captados.

El catálogo de escenas Landsat 1 a 3 usa una cuadrícula mundial de referencia (Figura 1.3) conocida como WRS-1 (Worldwide Reference System), en el caso de los satélites a partir del 4 utilizan WRS-2, con esta cuadrícula cada imagen recibe un número específico de columna y fila (path y row), en el caso del territorio mexicano son 138 imágenes las que lo cubren y van de la columna 18 a la 40 y de la fila 37 a la 50 (Romano, 2018).

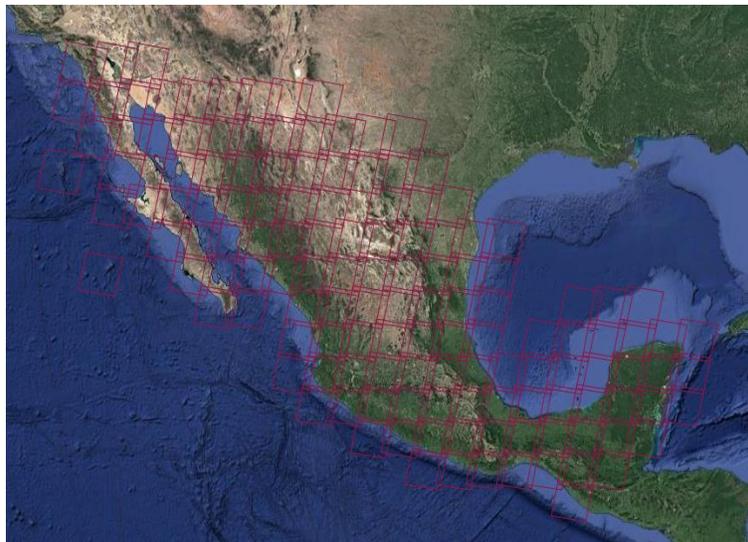


Figura 1.3. Cuadrícula de escenas Landsat que cubren el territorio mexicano. Fuente: <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>.

1.6. Detección de cambios

La *detección de cambios* (change detection en inglés) de la cobertura de suelo es importante para identificar la pérdida o ganancia de una especie, la frecuencia con la que se producen y los factores que intervienen en el proceso, aunado a esto se puede conocer

el impacto que tiene en el ambiente. La detección oportuna y precisa del cambio proporciona la base para una mejor comprensión de las relaciones e interacciones entre los fenómenos humanos y naturales, con el objeto de gestionar y utilizar mejor los recursos (Abdelaziz, 2019).

En percepción remota la detección de cambios es el proceso de identificar diferencias entre imágenes en diferentes fechas (Singh, 1989, citado por Zhe, 2017). El objetivo de la detección de cambios es discernir aquellas áreas en las imágenes digitales que representan cambios en la característica de interés entre dos o más fechas de imágenes. La confiabilidad del proceso de detección de cambios puede estar fuertemente influenciada por varios factores ambientales que pueden cambiar entre las fechas de las imágenes (Mishra **et al.**, 2017). De acuerdo con las definiciones anteriores, la detección de cambios es un proceso dentro de la percepción remota, en el cual se identifican en imágenes satelitales de dos o más fechas alteraciones en la cobertura de suelo en una misma área geográfica.

En la bibliografía consultada sobre detección de cambios, clasifican este proceso en 6 métodos principales:

- *Álgebra*. La detección de cambios basada en álgebra consiste en aplicar operaciones matemáticas en cada píxel de imagen para obtener la imagen de diferencia (Asokan y Anitha, 2019). Los métodos basados en álgebra incluyen diferenciación de imágenes, regresión de imágenes, relación de imágenes,

diferenciación de índices de vegetación, análisis de vectores de cambio CVA y sustracción de fondo. Estos métodos (excepto CVA) son relativamente simples, directos, fáciles de implementar e interpretar, pero no pueden proporcionar matrices completas de información de cambio (Mausel **et al.**, 2004). En esta categoría dos aspectos son fundamentales de considerar para los resultados: la selección de las bandas de la imagen o el índice de vegetación, así como la selección de umbrales para identificar las áreas que han cambiado (Pineda, 2011).

- *Transformación.* Esta categoría de detección de cambios implica el uso de transformaciones en los píxeles de la imagen para detectar los cambios (Asokan y Anitha, 2019). La categoría de transformación incluye análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés), Kauth Thomas (KT), Gramm-Schmidt (GS) y Chi-cuadrada. Una ventaja de estos métodos es que reduce la redundancia de datos entre bandas y enfatiza la información diferente en los componentes derivados. Sin embargo, no pueden proporcionar matrices de cambio detalladas y requieren la selección de umbrales para identificar áreas cambiadas. Otra desventaja es la dificultad de interpretar y etiquetar la información de cambio en las imágenes transformadas (Mausel **et al.**, 2004).
- *Clasificación.* La categoría de clasificación incluye comparación posterior a la clasificación, análisis combinado espectral-temporal, Expectation-Maximization algorithm (EM), detección de cambios no supervisados, detección de cambios híbridos y redes neuronales. Estos métodos se basan en las imágenes clasificadas, en las que la calidad y la cantidad de datos de muestra de entrenamiento son importantes para obtener buenos resultados. La principal ventaja de estos métodos es la capacidad de proporcionar una matriz de información de cambio y reducir el impacto externo de las diferencias atmosféricas y ambientales entre las imágenes multitemporales. Sin embargo, seleccionar conjuntos de muestras de entrenamiento

de alta calidad y suficientemente numerosos para la clasificación de imágenes a menudo es difícil, en particular para la clasificación de datos de imágenes históricas (Mausel **et al.**, 2004).

- *Modelos avanzados.* Esta categoría incluye el modelo de reflectancia Li-Strahler, los modelos de mezcla espectral y los modelos de estimación de parámetros biofísicos. El modelo avanzado para la detección de cambios consta de diferentes modelos de reflectancia y modelos de mezcla espectral. La idea principal detrás de estos métodos es la conversión del valor de reflectancia de la imagen a parámetros físicos. Mediante estos parámetros físicos podemos extraer la información sobre el problema de la teledetección (Asokan y Anitha, 2019).
- *Sistemas de Información Geográfica.* Esta categoría incluye el método SIG integrado con teledetección y el método SIG puro. La principal ventaja es la capacidad de integrar datos de diferente origen. Sin embargo, esta ventaja puede afectar a los resultados ya que la presencia de diferentes fuentes de información con diferentes precisiones puede intervenir en los resultados.
- *Análisis Visual.* Incorpora la interpretación visual de imágenes multi-temporales, digitalización en pantalla de las áreas de cambio, textura, forma, el tamaño de las imágenes son elementos claves para la identificación de los cambios (Pineda, 2011). Este método aprovecha el conocimiento y experiencia del analista, la textura, forma y tamaño de los patrones de las imágenes son claves para la identificación del cambio.

1.7. Umbralización

Existen otros métodos que pueden aportar en la identificación de áreas con cambio. La umbralización de imágenes digitales, es una de estos que se utiliza para el reconocimiento

de objetos, la cual no es exclusiva del campo geográfico, por ello el amplio número de trabajos en el tema.

Primero es importante entender sobre el proceso de *segmentación* ya que de este surge la umbralización como una técnica para el reconocimiento de información. García (2018) define la segmentación como una “división de píxeles de una imagen digital en distintos grupos denominados super-píxeles”; por otra parte, Macedo (2012) dice que la segmentación es un proceso por el cual se obtiene una representación de una imagen en la que cada píxel pertenece a un objeto, formándose una lista de objetos a partir de los píxeles que poseen la misma característica. De manera sencilla y general, Jiménez **et al.**, (2015), definen a la segmentación como el proceso de dividir una imagen en regiones. De acuerdo con las definiciones anteriores, la segmentación es el proceso en el cual se agrupan los píxeles de una imagen digital en regiones según los valores de estos con el objetivo de resaltar y extraer información de interés del resto de la imagen.

Según las definiciones anteriores, la segmentación es un proceso general para extraer información de interés de una imagen, sin embargo, como mencionan Baez **et al.**, (2004) esta se divide en cuatro grandes grupos, “el primero lo conforman las técnicas de segmentación basadas en los valores del píxel; el segundo grupo contiene técnicas de segmentación basadas en el área; las técnicas basadas en orillas pertenecen al tercer grupo y finalmente las técnicas basadas en la física”. Por lo anterior, existe una amplia variedad de técnicas de segmentación que su uso dependerá de las características de la

imagen y de la información que se quiere extraer. La umbralización o segmentación basada en el histograma, es uno de los métodos más populares en la segmentación de imágenes y la empleada para la realización del presente trabajo, ayudando a resaltar información que se traduce como cambios.

La umbralización es definida por Riomoros (2016) como una técnica de segmentación que define un umbral de forma que separa los objetos de interés respecto del fondo. En 1984, Tsai define a la umbralización como un método de clasificación de píxeles de una imagen en color gris en dos grupos: uno que incluye píxeles con valores de gris por encima del umbral y otro con valores igual o por debajo de este mismo; a esta definición se suma la de García (2018) que lo define como un proceso que busca la binarización de una imagen en escala de grises para diferenciar los objetos de primer plano de los del fondo. Por último, Cattaneo **et al.**, (2010) dice que la umbralización consiste en binarizar una imagen en gris a partir de un umbral óptimo que separe los píxeles en dos regiones. Como vemos en las definiciones la mayoría de las técnicas son empleadas en imágenes en escala de grises, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo se utilizaron imágenes en color RGB, por lo que, para el tratamiento de este tipo de escenas, como menciona Gil y autores (2004), consiste en segmentar la imagen en tres capas debido a los canales de rojo, verde y azul (Red, Green, Blue) que la conforman y así obtener un umbral para cada capa.

El umbral por utilizar para la segmentación de la imagen puede categorizarse en dos tipos principalmente: a) umbral global o único, se aplica a histogramas bimodales y del cual se

obtendrán dos regiones; b) umbral multinivel o local, se emplea más de un umbral para la imagen debido a la presencia de varios objetos en ella. Como consecuencia, establecer el umbral óptimo es quizá la etapa más importante en la clasificación o segmentación de imágenes, ya que de este se podrán identificar con mayor precisión aquellos elementos que nos guiarán a la detección de cambios. Es sabido que existen diferentes métodos de umbralización, sin embargo, para finalidad del presente trabajo, se detallarán los 4 tipos de umbrales utilizados que son los propuestos por Otsu, Tsai, Kapur y Kittler.

El método basado en la clusterización o agrupamiento se enfoca en agrupar los píxeles en dos clases el fondo y objeto (background y foreground), modelan el histograma como una superposición de funciones gaussianas (Cattaneo **et al.**, 2011) utiliza los momentos acumulativos de primer orden y cero del histograma para calcular el valor del nivel de umbral. En esta clasificación, el método de Otsu (1979) es uno de los más utilizados, sobre todo porque considera características de la imagen como el ruido, iluminación e histogramas planos, utiliza la varianza para medir la dispersión de los niveles de gris; de acuerdo con Riomoros (2016), el objetivo del método de Otsu es calcular el valor del umbral de forma que la dispersión dentro de cada clase sea lo más pequeña posible, pero al mismo tiempo que la dispersión sea lo más alta posible entre clases diferentes. García (2018), menciona que el algoritmo del mínimo error de Kittler e Illingworth (1986) también pertenece a la categoría del método por clusterización, ya que este presupone que “el histograma a binarizar es un conjunto de dos funciones Gaussianas con distribución normal, una

perteneciente al fondo y otra al objeto de interés, donde cada una posee una media y varianza propia”.

Los métodos basados en la entropía son otra categoría en la umbralización, el umbral T separa la información en dos clases correspondientes al fondo y al objeto, determinando la entropía asociada a ellas (Cortés **et al.**, 2011), la máxima entropía es interpretada como el umbral óptimo. Uno de los representantes de este método es Kapur (1985), el cual considera que la imagen se divide en dos clases o momentos, cada uno caracterizado por la función de densidad de probabilidad, el método maximiza la suma de la entropía de las dos densidades para converger en un solo valor de umbral.

Por último, otro de los métodos más utilizados son los basados en los atributos de la imagen el cual consiste en establecer el umbral a partir de las similitudes (bordes, formas, niveles de gris, textura, entre otros) entre la imagen original y la imagen binarizada. En esta categoría se encuentra el algoritmo de preservación del momento de Tsai (1985), establece el umbral para que los tres primeros momentos de la imagen original se conservan en la imagen binarizada.

1.8. Sembrando Vida

Existen distintos factores relevantes en el cambio de uso del suelo, algunos autores como Galicia y colaboradores, 2007 se lo atribuyen principalmente a los demográficos, económicos, culturales, manejo forestal y políticas públicas, así como instituciones

encargadas del medio rural. La agricultura es uno de estos factores que impactan en mayor medida sobre el ambiente, la búsqueda del desarrollo económico rural ha llevado a la creación de políticas agrícolas que no consideran los impactos de la agricultura sobre la naturaleza.

Entender que es una política pública es de importancia para la comprensión del programa de interés, Sembrando Vida. “Una política pública se entiende como un conjunto de programas, proyectos o acciones que se llevan a cabo desde el Estado en sus distintos niveles y que se orientan hacia la intervención en diversos aspectos vinculados con un tema determinado” (Arzeno, 2014, citado por Castro 2016). De acuerdo con Cacho, 2016 las políticas públicas se han convertido en una herramienta que incorpora los intereses del Estado y de la sociedad a acciones concretas y objetivos específicos para la resolución de un problema. De otro modo, estas políticas son acciones tomadas por el gobierno para responder distintas demandas de tipo social, salud, educación, empleo, desarrollo entre otras.

De acuerdo con lo anterior, una política agrícola se puede entender como las medidas implementadas por el Estado para el mejoramiento de la productividad agrícola y bienestar de los agricultores. “Históricamente, uno de los principales instrumentos de la política agrícola ha sido el gasto público” (Cacho, 2016, p.20), por ejemplo, infraestructura, créditos y subsidios. Hasta 2016 en México existían tres principales políticas agrícolas según Cacho, 2016: PROCAMPO el cual fue el mayor programa de subsidios agrícolas de pago directo;

Alianza para el campo el segundo más importante de subsidios e inversión agropecuaria; y por último el tercer programa más importante de subsidios fue llamado Ingreso objetivo el cual formó parte de los programas de apoyo a la comercialización de ASERCA.

El crecimiento económico en el país está relacionado a consecuencias negativas principalmente sobre zonas rurales y el medio ambiente. Escalante (2006), menciona que el sector agropecuario es el principal demandante de recursos naturales; además que el atraso tecnológico, la pérdida de competitividad y el fracaso de las políticas públicas agudizan las condiciones de pobreza que se traducen en un mayor deterioro del medio ambiente. Las políticas agrícolas para “mejorar la producción y la productividad en el campo intensificaran aún más la presión de este sector sobre los recursos naturales a una escala global en los próximos años” (OCDE, 2004, citado por Fernández, 2013). En el caso de México, las políticas en materia agrícola no han cumplido con sus objetivos establecidos, la pobreza en las zonas rurales continúa creciendo, así como el descuido del campo estancándose la producción. Sumado a lo anterior, la dimensión ambiental no ha sido incorporada en la creación de estas políticas. “México necesita una política agrícola integrada en el marco de otra, de desarrollo rural y regional, y con la característica de ser integral” (Escalante, 2006, p.89), la incorporación de políticas o variables ambientales en las políticas agrícolas daría mejores resultados que beneficien al sector agrícola y al crecimiento económico del país y las zonas rurales pero que a la par conserve el medio ambiente. Una política integral que considere ambas materias promovería el desarrollo

sostenible, disminuiría los impactos negativos ambientales y mantendría las oportunidades sociales y económicas del desarrollo.

La conservación ambiental es un tema que ha ganado importancia en las agendas políticas de los gobiernos, sin embargo, la forma de lograrlo ha sido distinta, uno de los principales factores es el objetivo por alcanzar según el gobierno en curso. Las políticas en materia agrícola tienen un papel importante no solo en dicha actividad sino también en la conservación y aprovechamiento de los recursos naturales.

Según el artículo 27, fracción XX de nuestra constitución, el Estado debe promover las condiciones para el desarrollo rural integral, con el fin de generar empleo y garantizar a la población campesina su bienestar, participación e incorporación en el desarrollo nacional, así como fomentar la actividad agropecuaria y forestal para un óptimo uso de la tierra a través de infraestructura, insumos, créditos, servicios de capacitación y asistencia técnica (DOF, 2019). Las zonas rurales en México concentran la mayor riqueza en cultura, biodiversidad y recursos naturales, sin embargo, son también aquellas donde se registra un mayor índice de pobreza y rezago. En las últimas décadas han sufrido un importante proceso de deforestación y sobre explotación de sus recursos, causando la degradación de sus ecosistemas, afectando el potencial productivo que poseen y generando insuficiencias alimentarias de estas zonas, empeorando así las condiciones socioeconómicas de los pobladores, quienes se han visto forzados a migrar en busca de empleos (DOF, 2019). Por lo anterior, Sembrando Vida surge como una política pública agrícola con la llegada del

gobierno actual (sexenio 2018-2024), la cual busca el bienestar social de los sujetos agrarios sin embargo el tema ambiental continúa ausente.

1.8.1. Objetivos

Sembrando Vida entró en vigor en el mes de marzo del 2019 después de ser publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), del cual se obtienen los lineamientos que rigen el programa y que se presentan en este trabajo. El programa está diseñado para atender a la población rural que se encuentra en las regiones de más alta biodiversidad del país, que vive en localidades marginadas y que obtienen ingresos inferiores a la línea del bienestar rural fijada por el Consejo de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), busca que las zonas rurales puedan convertirse en un sector estratégico para el desarrollo del campo bajo un enfoque de sustentabilidad, la recuperación de la cobertura forestal y la de tierras no productivas para la generación de empleos. El Programa incentiva a los campesinos (sujetos agrarios, como los llama el programa) a establecer sistemas productivos agroforestales, el cual combina la producción de los cultivos tradicionales en conjunto con árboles frutícolas y maderables, con prácticas de conservación del suelo.

1.8.2. Lineamientos

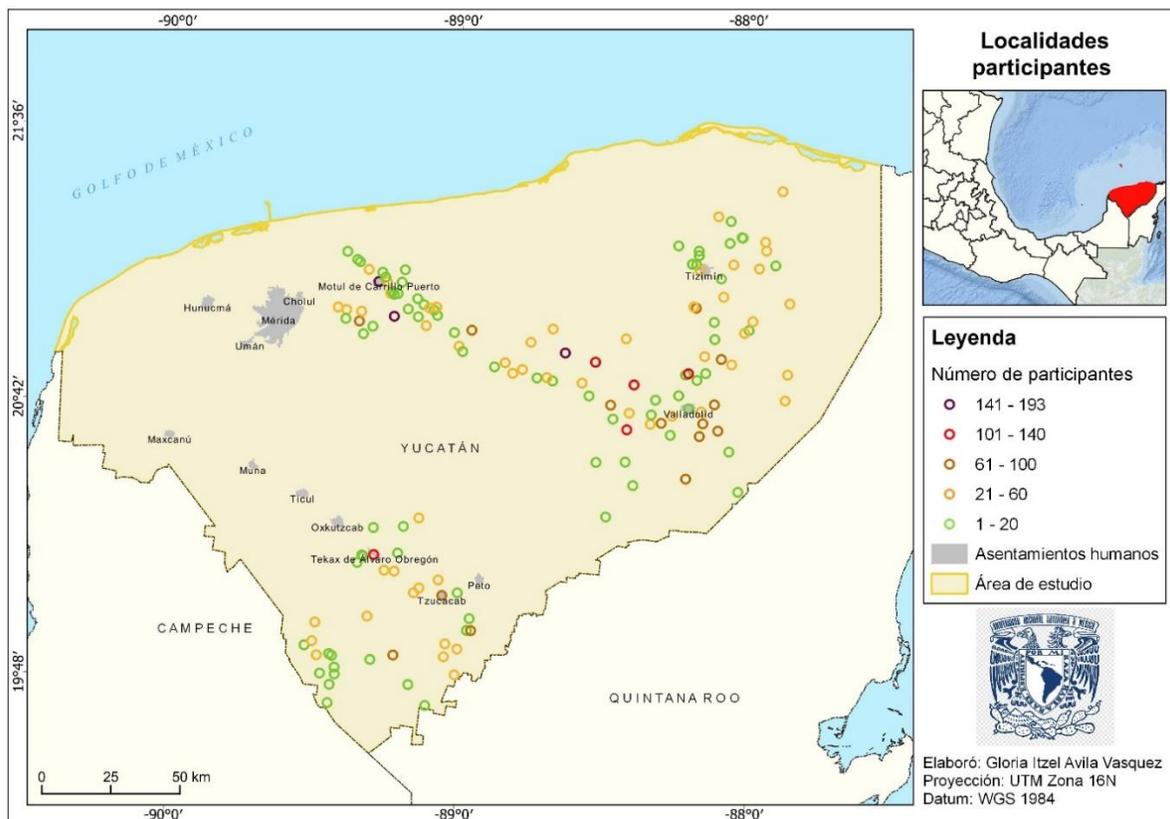
- Cobertura y población potencial. El programa tiene cobertura en 19 entidades federativas: Campeche, Chiapas, Durango, Puebla, Chihuahua, Colima, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, Yucatán, San Luis Potosí, Sinaloa, Tamaulipas y Tlaxcala, es importante mencionar que se dará prioridad a las primeras ocho entidades. Los sujetos agrarios deben ser

mayores de edad que habiten en alguna localidad rural de las anteriores entidades, con un ingreso inferior a la línea de bienestar rural y que sean propietarios de 2.5 hectáreas disponibles para trabajar, sin embargo, serán prioridad las personas en edad productiva, mujeres campesinas e indígenas y sujetos que no participen en otro programa federal.

- Unidades de producción:
 1. Cada unidad de producción debe conformarse por 2.5 hectáreas y trabajada por un solo sujeto de derecho.
 2. Entre la localidad en la que vive el sujeto agrario y la unidad de producción, debe haber una distancia máxima de 20 kilómetros.
 3. Si el sujeto de derecho tiene una superficie mayor a 2.5 hectáreas, puede ceder a familiares o a terceros el uso y goce de hasta 17.5 hectáreas de tierra, mediante la celebración de contratos de aparcería.
 4. La unidad de producción puede estar ubicada dentro de un ejido, tierra de uso común o pequeña propiedad. En cualquier caso, el sujeto agrario debe tener la propiedad o posesión sobre la tierra y ésta debe encontrarse libre de conflicto.
 5. La unidad de producción debe estar disponible para implementar el programa agroforestal, y tener alguna de las siguientes características:
 - a) Que se encuentre ociosa o abandonada
 - b) Estar en condiciones de potrero
 - c) Tenga cultivo de milpa
- Tipos y montos de apoyo. Los sujetos agrarios beneficiados pueden contar con los siguientes apoyos: económico según lo establecido de \$5,000.00 mensuales por el cumplimiento del plan de trabajo del Programa en la unidad de producción de 2.5

hectáreas; y contar con los siguientes apoyos en especie, dependiendo del tipo de cultivo a establecerse en cada territorio: plantas, insumos, herramientas, viveros comunitarios y biofábricas. Adicionalmente, podrán contar con acompañamiento técnico y formación permanente.

De acuerdo con los lineamientos solicitados para ser sujeto de derecho, hasta el momento en Yucatán son 4,591 participantes registrados en el programa los cuales se encuentran distribuidos en 148 localidades como lo muestra el mapa 1.1. Podemos ver que en la mayoría de las localidades el número de participantes es menor a 60, únicamente ocho cuentan con más de 100 registros.



Mapa 1.1. Número de participantes del programa Sembrando Vida y su distribución por localidad. Elaboración propia.

1.9. Sistemas socio-ecológicos

El concepto de sistemas ha sido utilizado por dos líneas de pensamiento diferentes, la Teoría General de Sistemas (TGS), corriente iniciada por Ludwig Von Bertalanffy; y la teoría de las ciencias de sistemas o ingeniería de sistemas (Johansen, 1993). “Un sistema es un conjunto de elementos llamados subsistemas que pueden ser considerados como unidades o compartimentos, y que mantienen constantes interacciones entre sí” (Almenar **et al.**, 2002, citado por Orozco 2019, p.6). De forma general, Johansen 1993 define a un sistema como un grupo de partes coordinadas y en interacción para alcanzar un conjunto de objetivos.

Para facilitar el estudio de los sistemas, han surgido varias clasificaciones (Domínguez y López, 2017):

- En relación con su capacidad para comunicarse e interactuar con el medio ambiente
 1. Sistema abierto. Están en constante interacción con su ambiente, lo que determina su viabilidad.
 2. Sistema cerrado. Aquellos que están aislados de su ambiente, ningún elemento de afuera entra y ninguno sale del sistema.

- En relación con su dinamismo
 1. Estáticos. No reaccionan ni se modifican por la influencia de su ambiente.
 2. Dinámicos. Evolucionan constantemente debido a factores internos y externos.

3. Homeostáticos. Aquellos que son capaces de autorregularse.

- Según su estructura

1. Sistemas rígidos. A los que se les puede aplicar el método científico para su estudio.
2. Sistemas flexibles. Tienen características conductuales, vivientes y pueden cambiar con su ambiente.

La TGS tiene su principal enfoque en los sistemas abiertos, por tanto, esta teoría considera a los sistemas como una totalidad, como un organismo que no se encuentra aislado donde el todo representa más que la suma de sus partes (Orozco, 2019). “Es decir, un sistema es un todo que no puede ser dividido en partes independientes, de lo contrario se pierden sus partes esenciales, las cuales se derivan de las interacciones de sus partes” (Ávila y Perevochtchikova, 2019, p.14).

Los sistemas pueden poseer una característica conocida como complejidad sistémica, a partir de la cual se convierten en sistemas complejos. La característica de complejidad dio paso al surgimiento de la Teoría General de los Sistemas Complejos (TGSC) (Orozco, 2019). Un sistema complejo se entiende como “una gran cantidad de componentes, sin (necesariamente) un controlador central y con reglas de operación simples que da lugar a un comportamiento colectivo, con un mecanismo de adaptación a través del aprendizaje y evolución” (Ávila y Perevochtchikova, 2019, p.19). “Existen distintas clases de sistemas complejos, tales como los dinámicos, los no lineales y los adaptativos. Un tipo de sistemas

complejos adaptativos son los sistemas socio-ecológicos (SSE) o, también conocidos como socio ecosistemas” (Orozco, 2019, p.8).

Los estudios sobre detección y evaluación de cambios de uso de suelo deben ser interdisciplinarios debido a los factores y elementos que intervienen, debe existir una correlación entre las ciencias físicas y sociales con el fin de obtener un mejor resultado que beneficie al ambiente y a la sociedad, comprendiendo cómo se relacionan los componentes sociales y ecológicos. Martín y Montes (2011) creen que estudiar las relaciones entre naturaleza y sociedad implica cómo el ser humano afecta a la integridad de los ecosistemas, y cómo éstos repercuten en el bienestar humano. De esta manera, se reconoce el vínculo existente entre ecosistema y bienestar humano, o lo que es lo mismo, entre ecosistemas y sistemas sociales. De hecho, en un proceso de coevolución, los sistemas humanos y los ecosistemas se han ido moldeando y adaptando conjuntamente, convirtiéndose en un sistema integrado de humanos en la naturaleza denominado sistema socio-ecológico o socioecosistema. Es así como el SSE es la base para la realización de este trabajo ya que logra establecer una relación entre la naturaleza y la sociedad.

“Un sistema socio-ecológico se define como una compleja estructura que puede ser analizada considerando el subsistema social y el subsistema ecológico. El primero conformado de comportamientos (instituciones políticas, económicas y sociales, así como tecnología) e ideas (valores, ideologías, cultura, conocimiento). Mientras que el subsistema ecológico incluye todos los ecosistemas, minerales, hidrología, clima, procesos físicos,

químicos y biológicos de la biósfera” (Raskin, 2006, citado por Castillo y Velázquez, 2015, p.19). Challenger **et al.**, (2014) definen a un sistema socio-ecológico como un sistema social (y sus subsistemas y elementos) integrado a un sistema ecológico (y sus subsistemas y elementos), formando un conjunto inseparable, en el cual las relaciones recíprocas entre los componentes y subsistemas conducen la evolución del SSE como un todo. Binder y colaboradores (2013, citado por Llamas, 2018) definen a los sistemas socio-ecológicos como sistemas dinámicos que ayudan a comprender y describir las interacciones entre los componentes sociales y ecológicos.

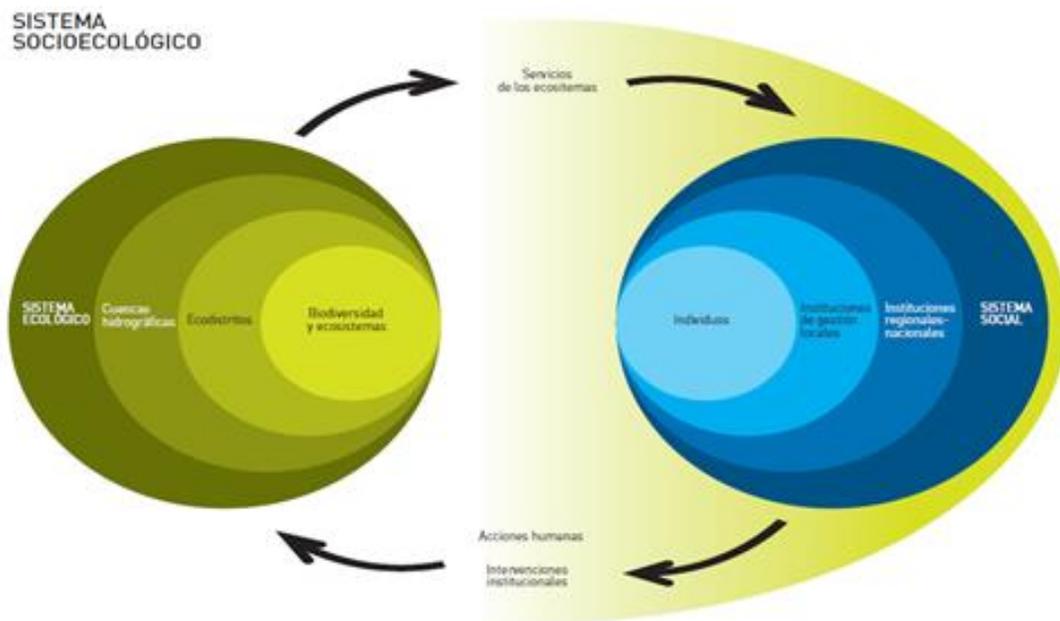


Figura 1.4. Elementos que componen un socio-ecosistema. Fuente: Martín, *et al.*, 2009 en Martín y Montes, 2011.

La figura 1.4 (Martín **et al.**, 2009, citado por Martín y Montes, 2011) muestra la estructura y componentes de un sistema socio-ecológico. El color verde representa el sistema ecológico, el cual tiene como ejemplos las cuencas hidrográficas, biodiversidad, entre otros.

Mientras que el sistema social, conformado por instituciones e individuos se observa en color azul. Estos sistemas existen y funcionan por separado, sin embargo, un sistema socio-ecológico busca la interacción entre ellos, la cual es representada a través de las flechas negras que pueden ser las acciones humanas sobre la biodiversidad o los servicios que ofrece el ecosistema a los individuos.

Las decisiones tomadas dentro de un SSE afectan directamente a los sistemas que lo conforman, por lo tanto, una buena comprensión del funcionamiento de estos permite una toma de decisiones que beneficien a todos los elementos. Martín y Montes (2011) denominan lo anterior como escalas de decisión, las decisiones de los sistemas sociales afectan directamente a los sistemas ecológicos, por ejemplo, los cambios de usos del suelo están determinados por decisiones en el sistema social que afectan directamente al estado de los ecosistemas. La puesta en marcha del programa Sembrando Vida tendrá influencia directa en el estado de la cobertura del suelo en la entidad. Por lo anterior, el enfoque de SSE es base para el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 2. Caracterización de la zona de estudio

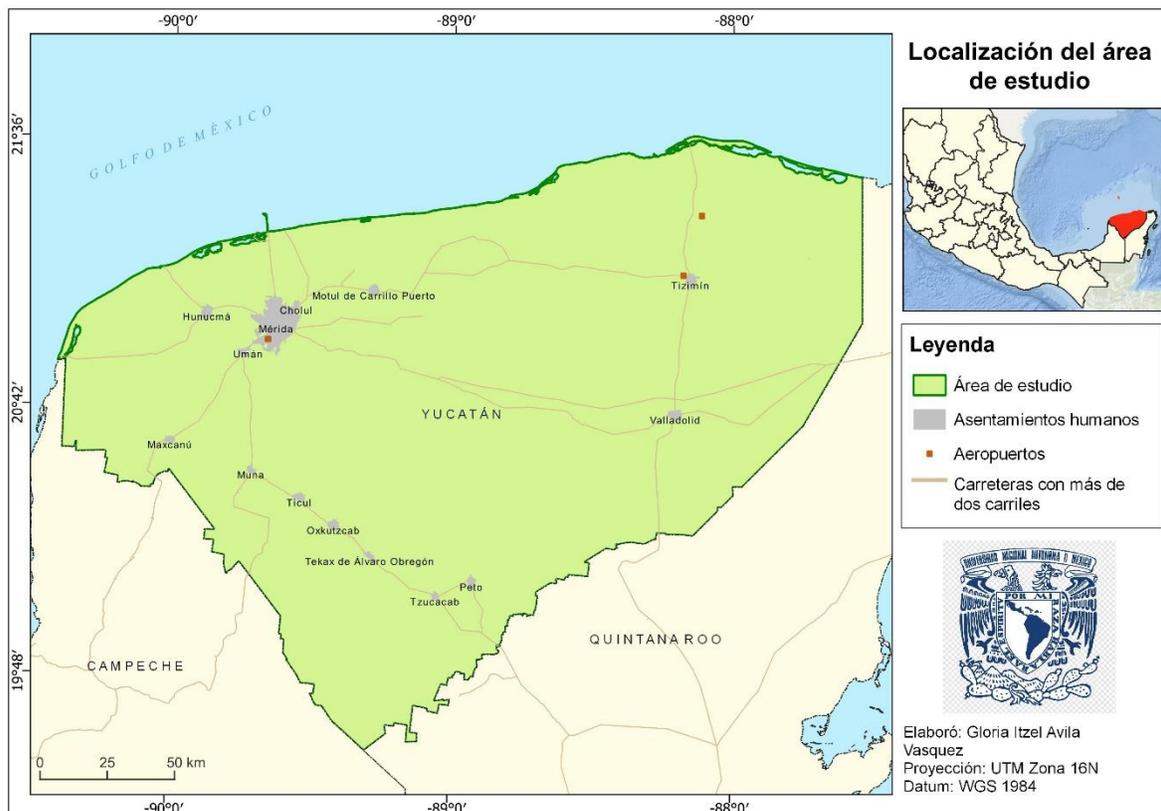
La Península de Yucatán es una región que es estudiada por diversas disciplinas, debido a sus elementos culturales, económicos y naturales, por mencionar algunos. Barrera (1962) denomina a la Península como una región geográfica debido a los elementos que comparten los estados que la conforman y, por los cuales puede ser estudiada desde la geografía. Yucatán es una de las tres entidades mexicanas que conforman la Península de Yucatán, sin embargo, esta región no siempre fue conocida como una península. Saucedo (2014) menciona que esta región era llamada únicamente Yucatán hasta el siglo XVI, no obstante, y a pesar de la separación, el nombre de “Península de Yucatán” fue utilizado por algunos investigadores (el primero fue Eligio Ancona en 1878) para designar a esta región conformada por los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo.

En este capítulo se describen las características geográficas del estado de Yucatán como la vegetación, clima, geología, entre otros; posteriormente las características socioeconómicas como la población y actividades económicas, las cuales en conjunto crean un sistema socioecológico complejo.

2.1. Localización

El estado de Yucatán se encuentra al sureste de la República Mexicana y al norte de la región Península de Yucatán, colinda al norte con el Golfo de México, al sureste con Quintana Roo y al suroeste con Campeche (mapa 2.1), sus coordenadas extremas son 21° 38' 00" N, 19° 33' 00" S y 87° 31' 55" E, 90° 24' 25" O. En cuanto a extensión territorial la

entidad cuenta con 39,537.02 km², lo que es equivalente al 2.02% del territorio mexicano, según datos del Marco Geoestadístico, citado por INEGI. Se dice que Yucatán es un estado urbano ya que el último censo poblacional en 2010 muestra que el 84% de la población es urbana y el 16% restante vive en localidades rurales. La entidad se conforma de 106 municipios (INEGI, 2017), siendo Mérida la capital.



Mapa 2.1. Localización del área de estudio. Elaboración propia con datos del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2010).

2.2. Contexto físico

El tema sobre el relieve de la Península de Yucatán ha sido escasamente tratado (Lugo **et al.**, 1992) y en su mayoría, los autores tienden a desarrollar trabajos tomando a la Península

en su totalidad como zona de estudio por lo que la información existente está enfocada a esta región, haciendo compleja la obtención de datos para el estado de Yucatán.

El paisaje yucateco es característico por su fisiografía regularmente uniforme, con un escurrimiento superficial apenas perceptible y formaciones conocidas como cenotes, los cuales son quizá, los fenómenos naturales más interesantes de Yucatán (Hall, 1963, citado por Barrera, 1962).

2.2.1. Geología

La totalidad del territorio de la entidad pertenece a la provincia fisiográfica Península de Yucatán, cuya base continental se formó en los períodos Eoceno y Oligoceno, debido a que emergieron depósitos marinos de carbonato de calcio y magnesio. En el escrito de Carballo (2016) se detalla el origen sobre los depósitos marinos encontrados en la entidad, esto debido a que la Península de Yucatán estaba unida al Bloque Luisiana-Texas las cuales fueron separadas al momento de la apertura del Golfo de México, su posición actual viene desde finales del triásico (hace aproximadamente 200 millones de años). A finales del Jurásico Medio, lo que hoy conocemos como Yucatán, comenzó a recibir sedimentos marinos, y es durante el Paleógeno que sucede la sedimentación de los carbonatos. A finales del periodo Neógeno la entidad se encontraba por encima del nivel del mar.

Por lo anterior, Yucatán es considerada como una “plataforma calcárea compuesta primordialmente de roca caliza” (períodos terciarios y cuaternarios) (Bonet y Butterlin, 2007, citado por Estrada **et al.**, 2019), que como se explicó anteriormente, se formaron a partir de

arrecifes coralinos expuestos a los agentes del intemperismo. En la mayor parte del territorio yucateco (93.83%) predominan rocas de tipo caliza, por otra parte, algunas zonas del sur y la franja costera del norte no existen unidades cronoestratigráficas y el suelo es de tipo lacustre, litoral, aluvial y residual, los cuales cubren 6.15% del territorio estatal (CONAFOR, 2013). En la figura 2.1 se muestra la clasificación geológica de la región Península de Yucatán, en el caso de la entidad yucateca la litología que se puede encontrar es más diversa en comparación con las otras dos entidades.

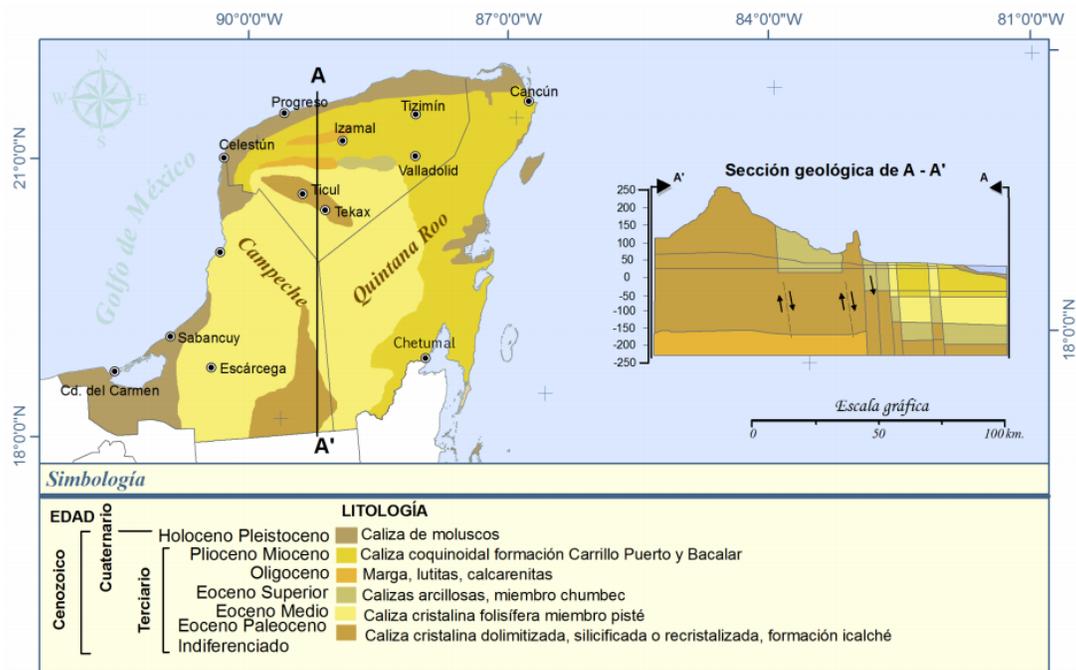


Figura 2.1. Clasificación geológica de la Península de Yucatán. Fuente: Carcía y Graniel, 2011, recuperado de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan#Cap1>.

2.2.2. Relieve

En México existen 391,700 km² de zonas kársticas (Gunn, 2004, citado por Estrada **et al.**, 2019), de los cuales 35,000 km² (8.93% del total del país) corresponden al estado de Yucatán (Kueny y Day, 2002 en Estrada **et al.**, 2019). En la figura 2.2 se muestran las zonas

kársticas en el país, su distribución y tipo, en el caso de Yucatán recibe la clasificación de karst de plataforma. El karst yucateco tiene su origen, como se explicó en el apartado de geología, en los arrecifes coralinos y sedimentos marinos que al exponerse a la superficie forman la roca caliza, esta es disuelta rápidamente por las lluvias dando origen al relieve cárstico formado por depresiones cerradas (dolinas, uvalas y poljés) (Aguilar, 2016, citado por Estrada **et al.**, 2019). Se tienen identificadas tres zonas kársticas en el estado: karst de la costa, karst de las colinas y el karst central. Este último, es importante debido a las formaciones que se ubican ahí alrededor del cráter de Chicxulub, estas son las dolinas conocidas como cenotes los cuales por su distribución forman el conocido “anillo de cenotes”.

KARST

NA III 3

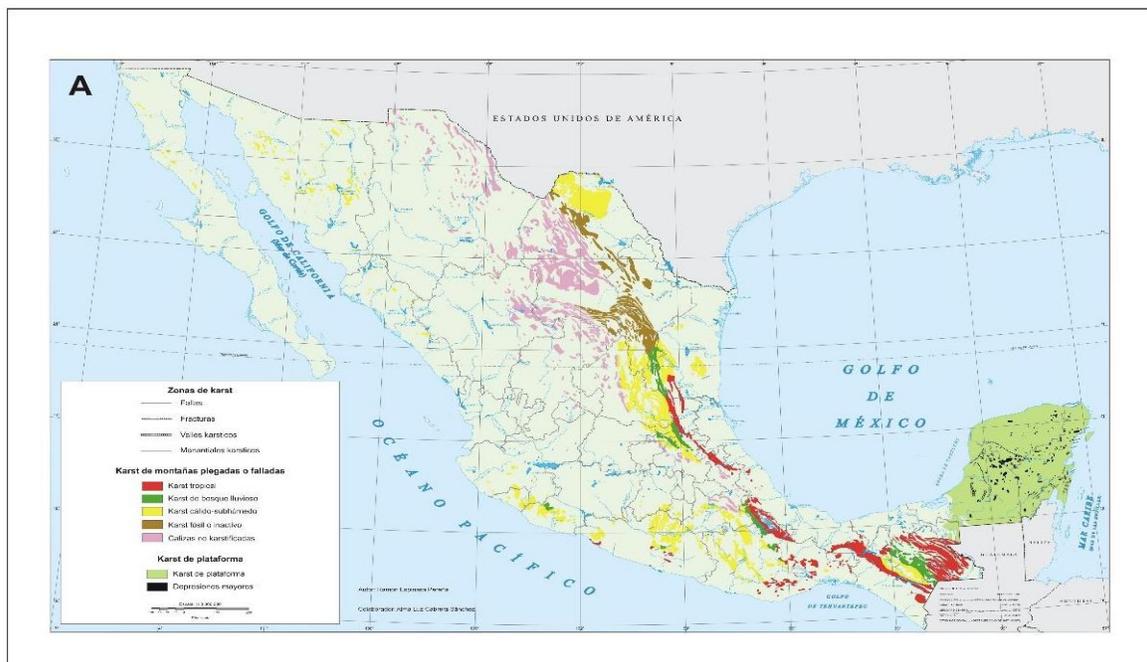


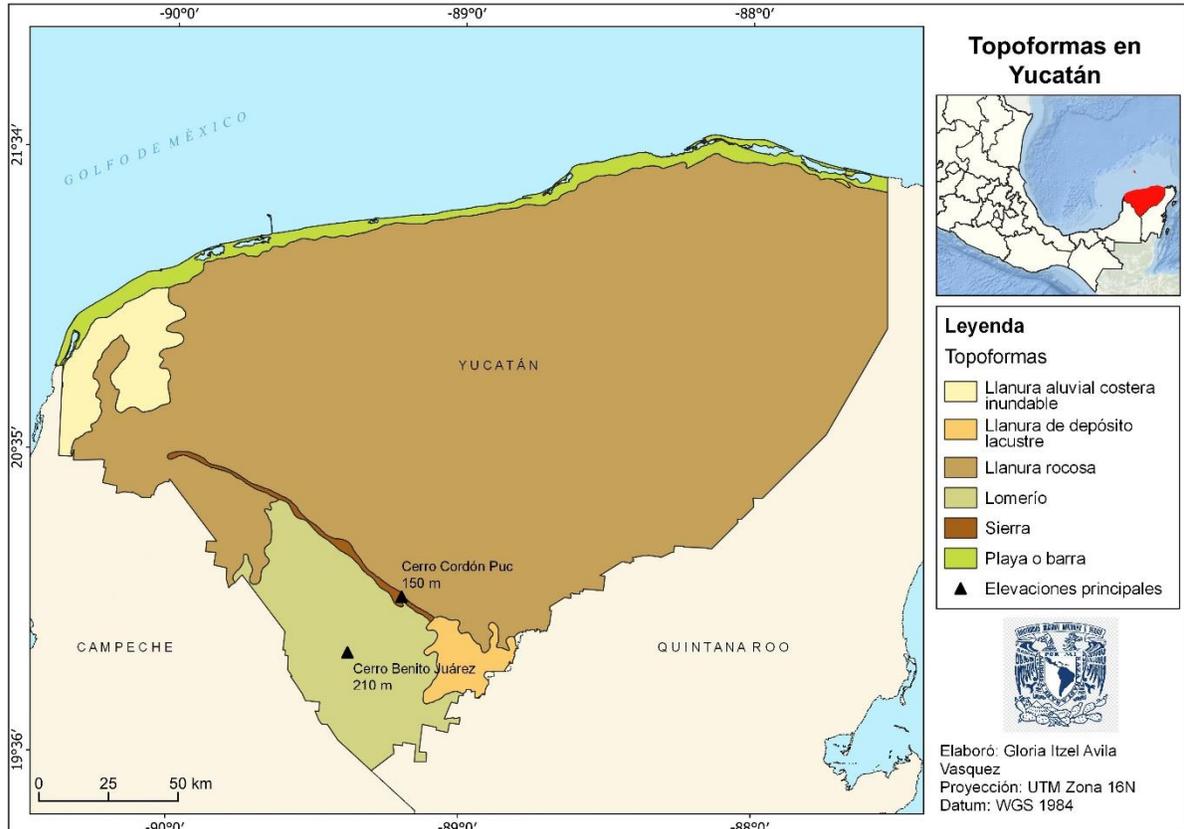
Figura 2.2. Mapa del Karst en México. Fuente: Espinasa, 2007, recuperado de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/154>.

Como se mencionó anteriormente, el relieve de Yucatán usualmente es descrito como una planicie de origen cárstico, con suaves e imperceptibles elevaciones. La altitud del relieve oscila entre 0 y 150-210 msnm, siendo las elevaciones principales el cerro Benito Juárez y el Cordón Puc (CONAFOR, 2013). En el mapa 2.2, observamos que la elevación mínima que se puede encontrar en la entidad son los -16 m la cual se ubica en la zona norte cercana a la costa; mientras que, hacia el sur y suroeste, al límite con Campeche encontramos una zona de mayor elevación, en ella se encuentran las principales elevaciones mencionadas anteriormente, así como la Sierrita de Ticul.

En el estado existen dos principales formas de relieve, las planicies y montículos; sin embargo, también se encuentran otras formaciones como las planicies inclinadas, planicies onduladas y planicies escalonadas de geometría diversa (Lugo y García, 1999, citado por Estrada **et al.**, 2019). En su obra Bautista **et al.**, (2011) escriben detalladamente sobre las geoformas del relieve del estado, las cuales se describen de forma resumida en este trabajo. *Planicies subhorizontales* las cuales son planas con montículos menores de 5 m, se dividen en dos tipos: a) costeras, las cuales están compuestas de depósitos de arena; b) las de tierra adentro de origen cárstico, las cuales ocupan 28% de la superficie del estado por lo que sobre ellas encontramos la mayor densidad poblacional. Las *planicies onduladas* son de dos tipos: a) planicies con inundación periódica, ubicadas entre la costa y las zonas cársticas; b) planicies kársticas con presencia de montículos de hasta 5 m y una gran cantidad de hondadas y cenotes, ocupan la mayor parte de Yucatán (57% de la superficie

total). La *Planicie colinosa* ocupa el 5% de la superficie del estado, en ella se encuentran colinas con alturas entre 10 y 20 m. al sur de Yucatán predominan los *valles interiores* las cuales son zonas cerradas dentro de un área de lomeríos altos cársticos, presentan un drenaje interno deficiente por lo que es una zona altamente susceptible a inundaciones. Los *lomeríos* son el relieve con más altura en la entidad, como ejemplo están los lomeríos de Ticul y de Sayil, conocidos localmente como “sierritas”.

La base de datos de INEGI cuenta con el sistema de topofomas a escala nacional de la cual se obtuvo la información correspondiente a la entidad (mapa 2.2). Las formas de relieve que podemos encontrar son principalmente seis: al norte la playa o barra; al oeste se encuentra una llanura aluvial costera que puede llegar a ser inundable ante un evento; la llanura rocosa es la topofoma dominante en Yucatán mientras que la sierra y llanura de depósito son las topofomas menos sobresalientes; por último, la zona de lomerío al suroeste, la cual pertenece a la subprovincia Lomeríos de Campeche.



Mapa 2.2. Topoformas en Yucatán. Elaboración propia con datos de INEGI.

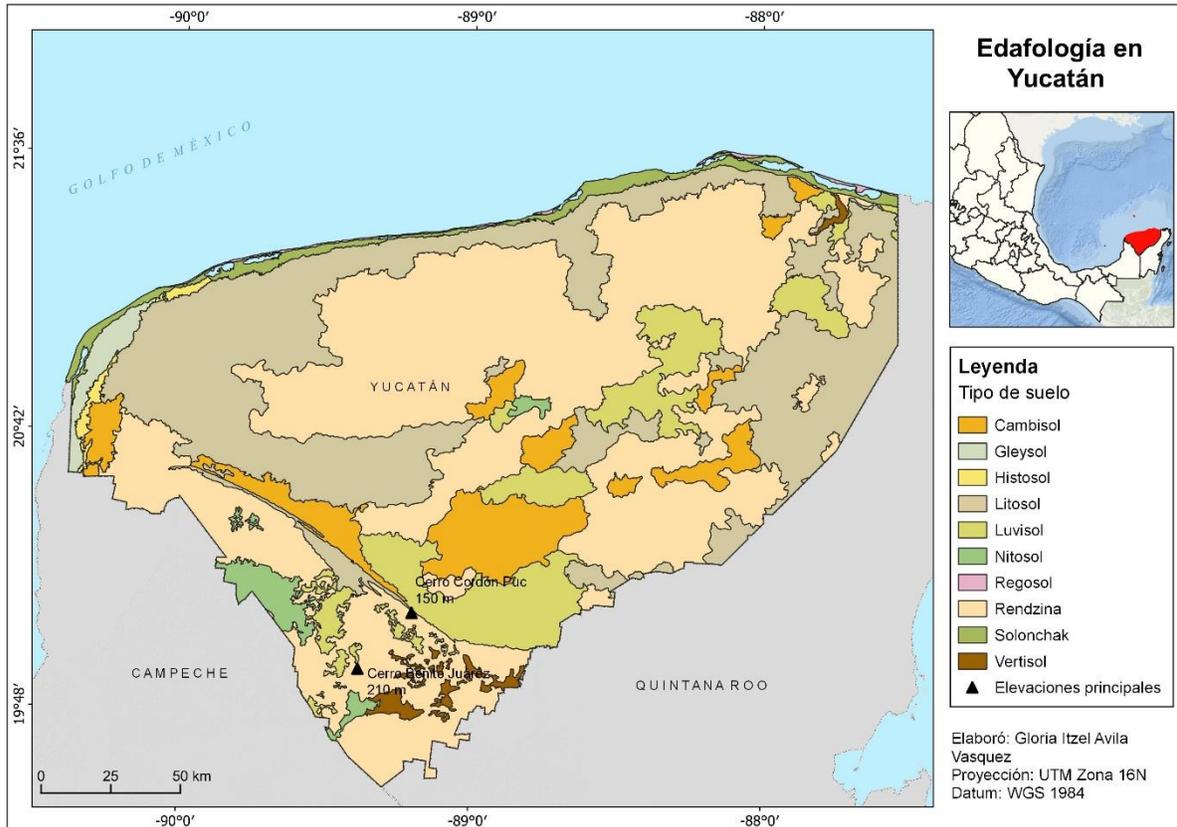
2.2.3. Edafología

Una de las consecuencias del paisaje kárstico es la escasez del suelo, esto sucede porque la disolución de las calizas deja pocos residuos. En su escrito sobre la Península Yucateca, Bautista y Palacio (2012) mencionan que la combinación entre el karst y el clima genera el proceso llamado “pérdida de suelo por lixiviación” o “pérdida de suelo por transporte vertical”, lo que provoca una carencia de suelo en la entidad. Las condiciones de relieve en la entidad han dado lugar a cuatro tipos generales de suelo, los suelos arenosos (presentes en la costa), los suelos orgánicos (asociados a humedales) y dos tipos más en el interior del estado, los de planicie (rojos) y los de montículo (negros) (Estrada *et al.*, 2019).

Aunque la roca caliza es el material que subyace a estos suelos, no es el principal material parental; los principales materiales parentales son los sedimentos marinos, residuos volcánicos ricos en ilita, caolinita, esmectita, montmorillonita y clorita y, polvos transportados por el viento desde África que aportan entre 33 g y 75 g de fósforo/ha/año (Cabadas **et al.**, 2010; Das **et al.**, 2013, citado por Estrada **et al.**, 2019); siendo los principales factores formadores de suelos la edad superficial y el clima (principalmente la precipitación), los cuales contribuyen en la disolución de la roca caliza y disminución de los carbonatos del suelo (Bautista **et al.**, 2011, citado por Estrada **et al.**, 2019).

De acuerdo con los datos de INEGI sobre la edafología nacional, en Yucatán se encuentran 10 clases de suelo como se muestra en el mapa 2.3: los *cambisoles* son suelos jóvenes y pocos desarrollados, con un horizonte enterrado diferente a la roca que le da origen al suelo. De manera general son suelos de buena calidad agrícola intensiva, tienen una extensión representativa en el territorio con 3,132 km² aproximadamente; el suelo de tipo *gleysol* se caracteriza por la prolongada saturación del suelo del acuífero. Presentan alto riesgo de inundación y alta fertilidad, abarca aproximadamente 412 km² del territorio; los suelos *histosoles* se caracterizan por que el componente mineral no tiene influencia significativa en sus propiedades, son poco profundos y contienen material orgánico acumulado en la superficie, se encuentran al noroeste del estado por lo que presentan vegetación de tipo manglar, tular y popal, alcanzan aproximadamente 170 km² del territorio. Cuando se interrumpen los flujos de agua, estos suelos se degradan y se convierten en suelos

solonchak o también llamados salinos, los cuales se caracterizan por su color blanco debido a la cantidad de sales que contienen. Estos suelos tienen un área aproximada de 840 km²; uno de los suelos con mayor extensión en la entidad son los de tipo *litosol*, 11,186 km² aproximadamente, se le encuentra cubriendo lomeríos y terrenos planos. Son característicos por su poca profundidad, menos de 10 centímetros, limitado por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido; los suelos *luvisoles* tienen una extensión representativa en el territorio con alrededor de 4,000 km², son suelos con acumulaciones de arcillas de color rojo o amarillo, así como fértiles con variedad de uso agrícola; el *nitosol* es un suelo profundo, arcilloso, con buen drenaje, es considerado productivo tiene una superficie de 627 km² sobre el estado; el *regosol* es el suelo con menor presencia en Yucatán, aproximadamente 117 km, se caracteriza por ser muy débilmente desarrollado y constituido de material suelto. Debido a su textura arenosa la fertilidad es limitada; el suelo predominante en la entidad es el de tipo *rendzina*, abarca alrededor de 18,460 km². Son suelos someros y pedregosos, poco profundos (menores a 25 centímetros), pero contienen una capa superficial abundante de materia orgánica y muy fértil; por último los suelos llamados *vertisoles* cuentan con una superficie de 349 km, son reconocidos por ser duros y con grietas que se abren y cierran periódicamente. En épocas de secas estos suelos suelen ser muy pesados mientras que durante las lluvias son pegajosos, debido a esto, el manejo del agua en este tipo de suelos es clave para lograr rendimientos agrícolas.



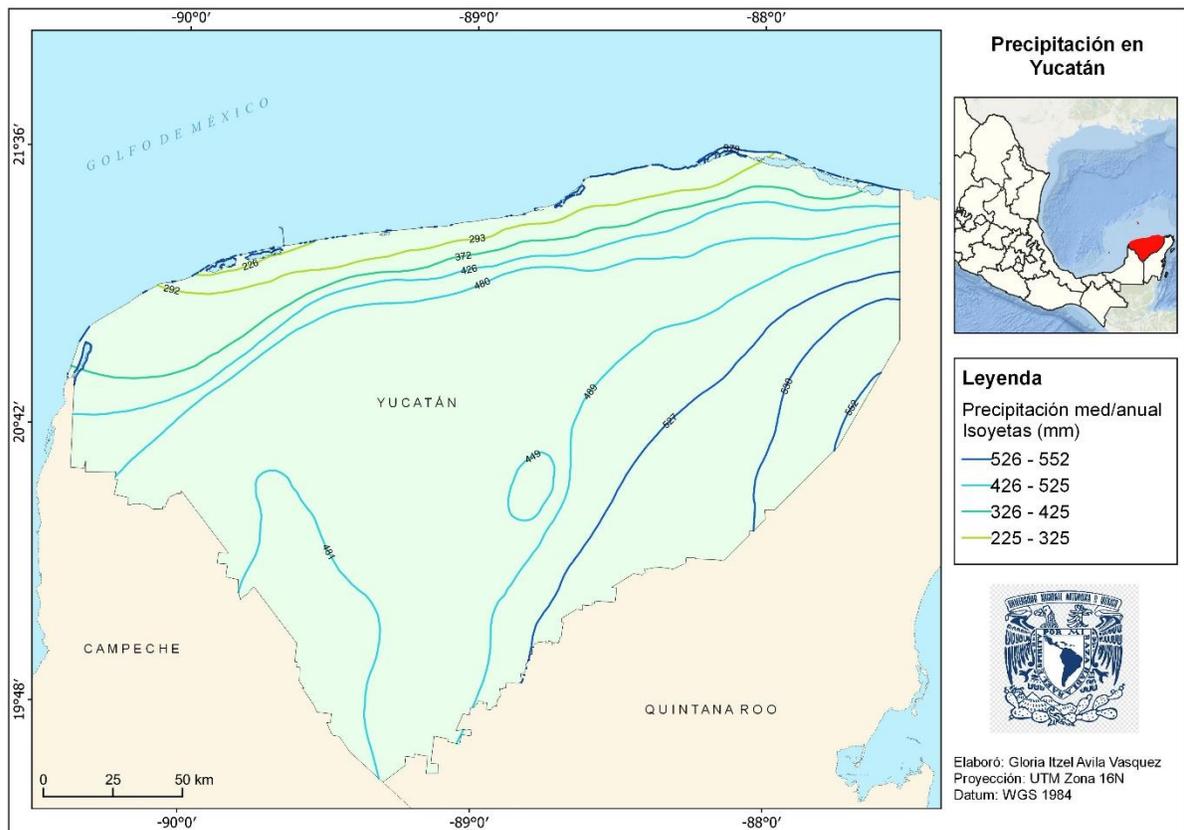
Mapa 2.3. Edafología en Yucatán. Elaboración propia con datos de INEGI.

2.2.4. Climatología

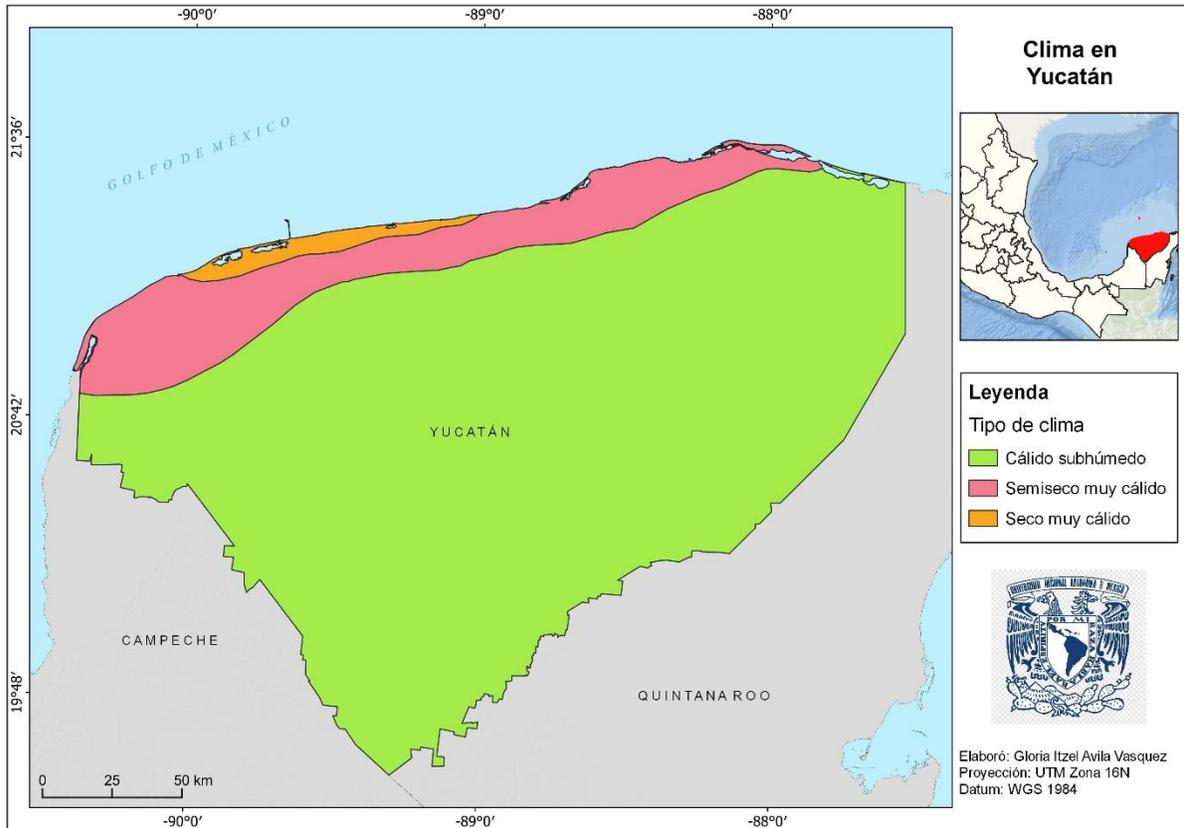
El clima es un factor dominante que afecta directa o indirectamente a la formación de los suelos e influye en otros factores como son la vegetación, topografía y actividad humana (DRAFT, 1998 en Bautista y Palacio, 2012). Por su ubicación geográfica y relieve con pocos contrastes altitudinales, el estado de Yucatán se localiza en una región tropical, situación que determina la presencia de un gradiente climático poco variado.

En general la lluvia se registra de mayo a octubre siendo más intensa en septiembre principalmente por efecto de perturbaciones tropicales (huracanes, tormentas y depresiones tropicales), la lluvia que llega en invierno es por aporte de los “nortes”. La

temperatura media anual en promedio es de 26 °C y los meses más frescos son diciembre, enero y febrero con temperaturas menores a los 22 °C (Vidal, 2005 en Bautista y Palacio, 2012). En el mapa 2.4 se presenta la distribución de la precipitación media anual de la entidad, al norte se encuentran registradas lluvias de 2,400 mm en promedio anualmente la cual va aumentando hacia el sureste del territorio alcanzando los 3,200 mm.



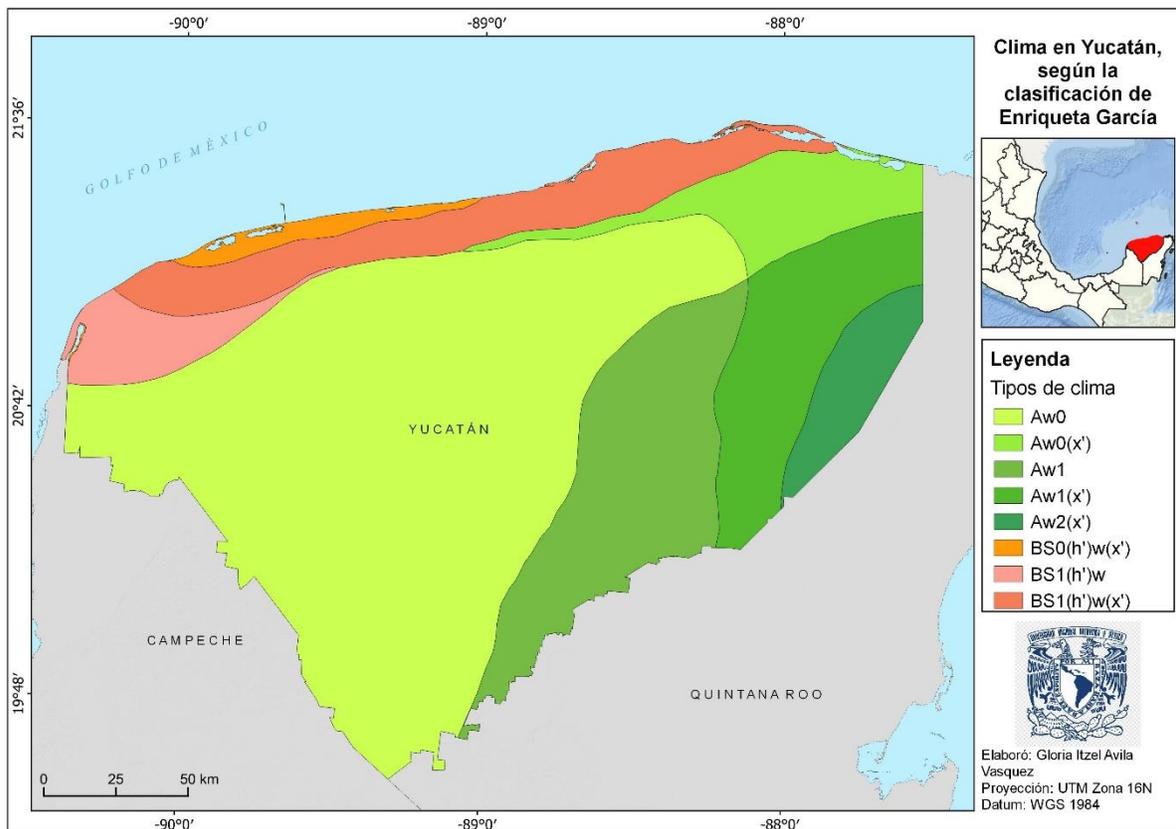
territorio, el segundo en extensión es el clima semiseco muy cálido y, por último, muy cerca de la costa se encuentra el clima seco muy cálido.



Mapa 2.5. Tipos de clima en Yucatán. Elaboración propia con datos de INEGI.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (mapa 2.6 muestra la modificación correspondiente a Yucatán), en el estado se presentan climas cálidos, con diferentes niveles de humedad, subhúmedos con régimen de lluvias de verano, con régimen de lluvias intermedio, hasta llegar a los climas secos (Orellana y colaboradores 1999, citado por Bautista y Palacio 2012). El grupo de climas cálidos se encuentra representado por cinco subtipos: Aw0, Aw0(x'), Aw1, Aw1(x'), Aw2(x'). La temperatura máxima promedio es de alrededor de 36 °C y se presenta en el mes de mayo, mientras que

la temperatura mínima es 16 °C durante el mes de enero, y las lluvias se presentan durante junio a octubre, en este tipo de clima predomina la vegetación de selvas ocupando el 80% de la superficie. Los tres subtipos restantes forman los grupos climáticos semiseco muy cálido y seco muy cálido, estos son BS0(h')w(x'), BS1(h')w, BS1(h')w(x'). Estos grupos climáticos se caracterizan por que la evaporación excede a la precipitación, en este clima la vegetación predominante es la selva ocupando 66.6% de su superficie.



Mapa 2.6. Tipos de clima en Yucatán, según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García. Elaboración propia con datos de INEGI.

2.2.5. Hidrología

La hidrología del estado de Yucatán es peculiar debido a diversos factores propios de la entidad como la topografía, clima y geología principalmente ya que al predominar la roca

de tipo caliza la infiltración del agua es mayor. Por un lado, estos factores limitan la formación de corrientes permanentes, sin embargo, también favorecen en la formación de acuíferos.

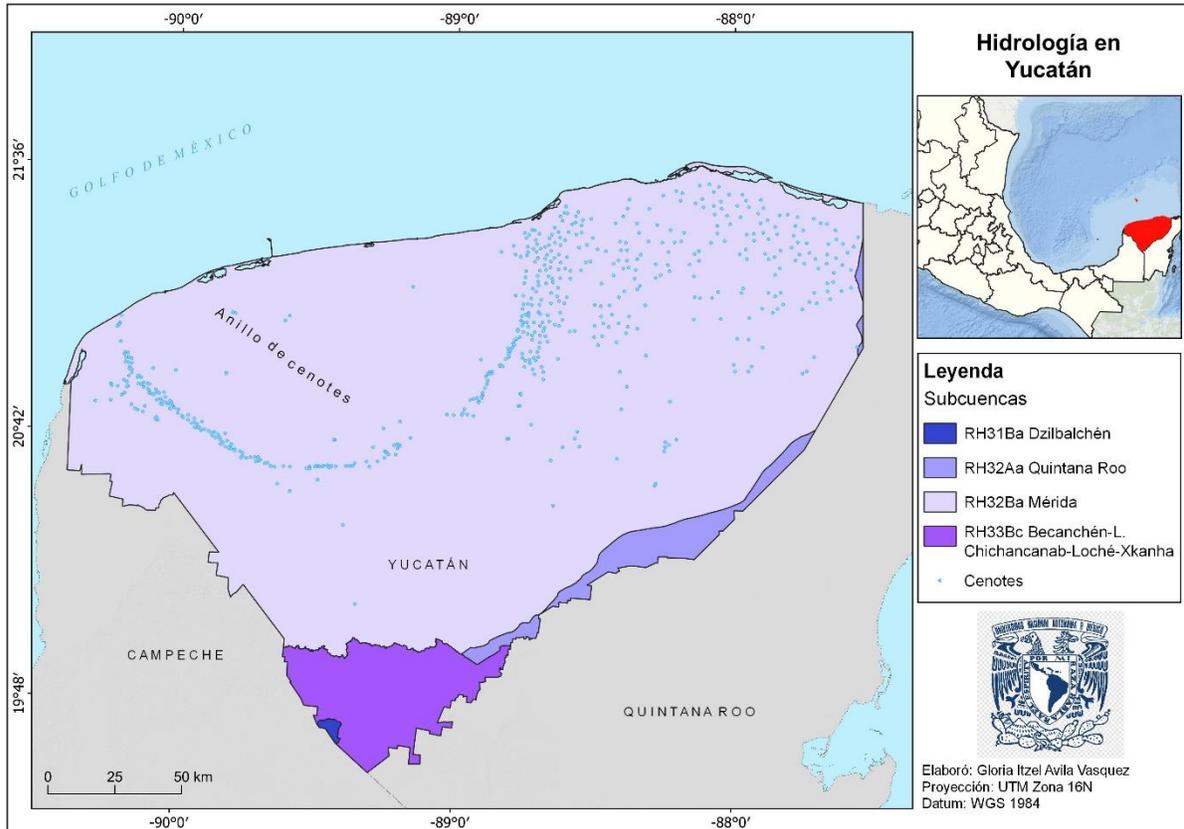
“El alto grado de fracturas en las rocas superficiales; un suelo delgado, de buen drenaje interno y altamente permeable; y la alta precipitación en la mayor parte de la península, permiten la formación de una compleja trama de cavidades subterráneas como grutas, cavernas, sumideros y cenotes” (Bautista y Palacio, 2012). Kauffer y Villanueva (2011) mencionan que el 97.4 por ciento del agua en la entidad es subterránea y únicamente el 2.6 por ciento es superficial. Estos cuerpos de agua o acuíferos subterráneos son continuos en casi toda la extensión de la entidad y tienen origen debido a la infiltración de la precipitación pluvial que corre a través de un sistema cavernoso. Estos acuíferos tienen una profundidad estimada de 80 a 120 metros en la parte más alta de la entidad y entre 2 a 3 metros en la parte más baja (CONAFOR, 2013).

De acuerdo con la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) e INEGI, en el mapa 2.7 se presenta la división hidrológica de la entidad. Administrativamente se conforma de tres Regiones hidrológicas (RH): RH31, RH32 y RH33. Dentro de la primer RH se encuentra la subcuenca Dzilbalchén la cual es la de menor tamaño y se localiza al suroeste de Yucatán; respecto a la RH32 se encuentran las subcuencas Quintana Roo y Mérida, esta última es la de mayor extensión en el estado, estas subcuencas se extienden a lo ancho del territorio. Es importante destacar que, en esta RH se encuentran las formaciones denominadas

cenotes, las cuales son de gran importancia por su función como abastecimiento de agua y turismo, que por su distribución forman el sistema hidrológico llamado “Anillo de cenotes”; por último la RH33 se conforma de la subcuenca Becanchén-L.Chichancanab-Loché-Xkanha-Sin nombre abarcando el sur de la entidad.

Los cenotes, del maya *tsonot* o *tsonoot* que significa cosa honda, abismo o profundidad, son formaciones de gran importancia en la entidad no solo por su valor histórico-cultural, sino como suministro de agua y recurso turístico. “Los cenotes son generados a partir de los procesos de disolución de las rocas de carbonato de calcio por la acción pluvial del ácido carbónico (Back y Hanshaw, 1978, citado por Suarez y Rivera, 1998), y por el paso de las aguas subterráneas. El desgaste de la roca va formando bóvedas inundadas de agua, llega un momento en el que el techo de estas se adelgaza tanto hasta desplomarse y la parte inunda queda expuesta total o parcialmente” (Stringfield y LeGrand, 1974, citado por Suarez y Rivera, 1998).

Yucatán es uno de los estados de la República Mexicana que no tiene problemas de abastecimiento de agua para satisfacer sus demandas, una de las razones que favorece esta situación es que la recarga supera por mucho la extracción de los acuíferos (Grael, 2011). Sin embargo, la problemática que enfrenta la entidad es la calidad del agua subterránea ya que es muy vulnerable a la contaminación que proviene de la mancha urbana y la diversificación de las actividades económicas.



Mapa 2.7. Hidrología en Yucatán. Elaboración propia con datos de INEGI.

2.2.6. Vegetación

Debido a las condiciones geográficas que caracterizan a la entidad se han desarrollado ecosistemas como selvas, manglares y otras áreas forestales. Según el Inventario Estatal Forestal y de Suelos se identificaron 15 diferentes tipos de vegetación en la entidad, cuyas características afines permiten agruparlas en cinco tipos: selvas altas medianas, selvas bajas, manglar, otras asociaciones, otras áreas forestales y áreas no forestales.

Flores **et al.**, (2011), clasificaron la vegetación terrestre del estado en 10 tipos: vegetación de dunas costeras la cual se encuentra en casi todo el litoral cubriendo aproximadamente 290 km²; el manglar es una de las comunidades de importancia en el país y en el estado

por sus funciones, se extiende a lo largo del litoral en especial en los bordes de las lagunas costeras y riadas; la selva baja caducifolia es una de las comunidades más extensa y que caracteriza al territorio abarcando 20,000 km²; la selva baja espinosa se extiende de forma paralela a la costa norte entre Sisal y Ria Lagartos; una de las comunidades más representativas es la selva mediana subcaducifolia, que ocupa aproximadamente 29,309 km²; la selva mediana subperennifolia es la comunidad más extensa de la región Península de Yucatán pero únicamente abarca el extremo nororiental y sur del estado; la selva baja inundable y sabanas son las comunidades menos representativas del estado; los petenes son las comunidades que caracterizan a la Península, en el estado se distribuyen de forma contigua a los manglares del occidente y norte del estado; las comunidades hidrófilas es la vegetación perteneciente a depósitos de agua como cenotes, aguadas y rejolladas; por último la vegetación secundaria también abarca una extensión importante del territorio ya que es el indicador de tierras que fueron utilizadas para actividades económicas.

Las actividades humanas han provocado importantes cambios en la cobertura vegetal del estado; según Durán y García (2010) existe un cambio en la extensión territorial ocupada por las comunidades selváticas en particular la selva mediana subcaducifolia la cual es sustituida por pastizal inducido y agricultura de temporal.

2.3. Contexto socioeconómico

Conocer las características socioeconómicas del área de estudio es de gran importancia ya que el enfoque del programa Sembrando Vida busca apoyar a la población rural mediante

actividades económicas como la implementación de sistemas agroforestales, por lo cual es necesario conocer la distribución de la población y sus ocupaciones.

2.3.1. Población y localidades participantes

Conocer la dinámica poblacional en la entidad es de gran importancia ya que el programa Sembrando Vida está dirigido a un sector de la población específica, por lo que es necesario conocerla y comprenderla.

De acuerdo con el Anuario Estadístico y Geográfico de Yucatán 2017, el estado se conforma por 106 municipios y 2,379 localidades rurales según el Marco Geoestadístico 2010. La población total en la entidad según los datos del Censo de población y Vivienda 2010 es de 1,955,577, de la cual 992,244 son mujeres y 963,333 son hombres; así mismo, se dice que Yucatán es un estado urbano ya que el censo reporta que el 84% de la población es urbana y el 16% restante vive en localidades rurales. La densidad de población reportada en el año 2015 es de 53.1 hab/km² valor que es inferior al promedio del país (61 hab/km²).

En el grafico 1 se presenta la estructura poblacional por edad y sexo en la entidad, se observa que el mayor número de población se encuentra en el cohorte de edad de 15 a 19 años. Este gráfico muestra estadísticamente, que el crecimiento poblacional es moderado y progresivo además de ser una población mayormente joven.

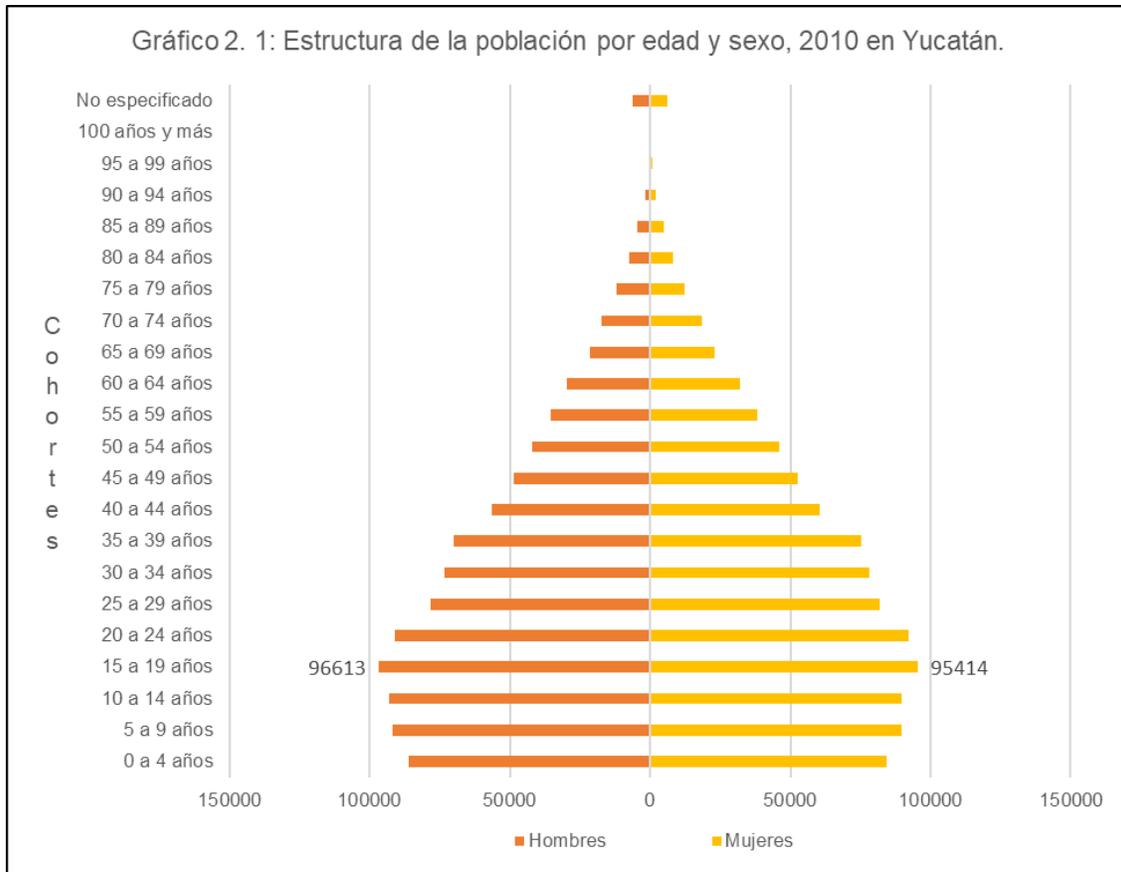


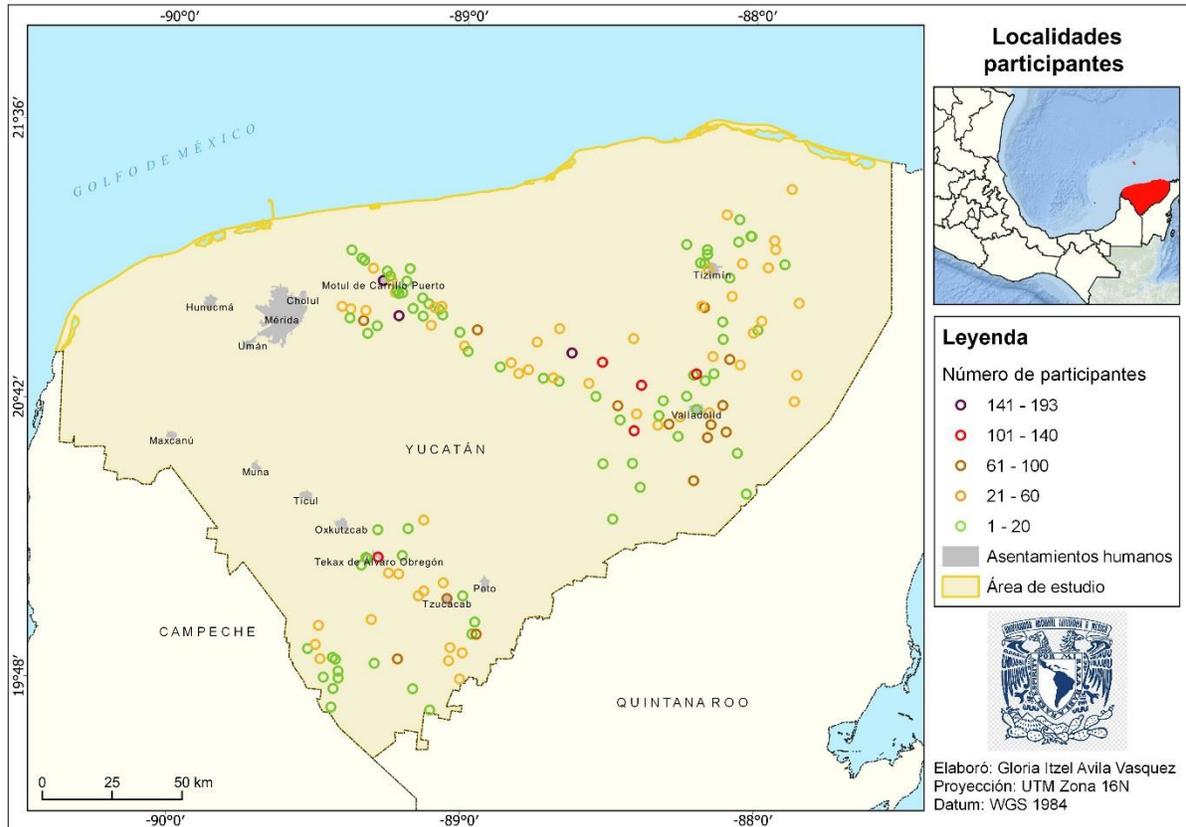
Gráfico 2.1. Estructura poblacional por edad y sexo en Yucatán. Elaboración propia con datos del Censo de Población y Vivienda (2010), INEGI.

Respecto a la Población Económicamente Activa (PEA), en la tabla 2.1 se muestra la PEA del estado y la nacional durante el primer trimestre del año 2020 en modo de comparación. La población en edad de trabajar (a partir de los 15 años) en el estado es de 1,716,518 de los cuales un 48.6% son hombres y el 51.4% son mujeres; la población económicamente activa es de 1,108,081 de la cual casi el 60% son hombres y el resto mujeres, de este número 1,086,089 están ocupados y 21,992 son desocupados. Más de la mitad de la población en Yucatán se encuentra en edad para trabajar, de este sector la PEA ocupada es superior a la desocupada por lo que se puede considerar que la mayor parte de la población tiene empleo.

Concepto	Nacional			Yucatán		
	Total	Hombres (%)	Mujeres (%)	Total	Hombres (%)	Mujeres (%)
Población total	126,661,703	48.3	51.7	2,242,702	48.6	51.4
Población en edad de trabajar	95,784,628	47.4	52.6	1,716,518	48.2	51.8
Población económicamente inactiva	38,456,264	27.9	72.1	608,437	26.9	73.1
Población económicamente activa	57,328,364	60.5	39.5	1,108,081	59.9	40.1
Ocupados	55,352,304	60.5	39.5	1,086,089	60.0	40.0
Desocupados	1,976,060	60.7	39.5	21,992	51.9	48.1

Tabla 2.1. Población laboral en Yucatán. Primer trimestre, 2020. Fuente: Indicadores económicos del estado de Yucatán, 2020.

El mapa 2.8 muestra el número de localidades y participantes donde se ha otorgado el programa en el estado. Hasta el momento son 148 las localidades que se han integrado a Sembrando Vida las cuales se encuentran principalmente distribuidas en el noreste y sur de Yucatán, y un total de 4,591 participantes. Los anillos de color verde y naranja, los cuales predominan en el territorio, representan localidades con 1 a 60 participantes mientras que son 3 las localidades en las cuales se encuentran de 141 a 193 integrantes.



Mapa 2.8. Número de participantes del programa Sembrando Vida y su distribución por localidad. Elaboración propia.

2.3.2. Actividad económica

Considerando que en las actividades económicas del Sector Primario (SP) se concentra la agricultura de diversos tipos como la agroforestal, por lo que el SP es de interés para la descripción de las actividades económicas en la entidad.

El sector de mayor aportación al PIB estatal es el terciario el cual hasta el año 2017 era del 69.03%, en segundo lugar, se encuentran las actividades secundarias con un 27.29%, mientras que el SP únicamente contribuye con el 3.68% (gráfico 2.2). Al comparar los datos anteriores, con los del año 1993 donde el SP fue del 7.8% se aprecia una disminución en

la participación productiva de este, por lo que se puede pensar que la economía del estado está basada en el sector terciario y muy poco en el SP como la agricultura.

Respecto al sector agrícola de la entidad, “históricamente ha estado dominada por la agricultura tradicional (milpa) y por el henequén” (Eastmond y García, 2010), con la disminución de la industria del henequén se dio paso a la diversificación de la agricultura. La agricultura de cítricos ha aumentado de manera importante debido a la implementación del Plan Chac a finales de los años sesenta. Otros cultivos que han ganado importancia en el estado son las hortalizas y frutales como papaya, sandía y melón.

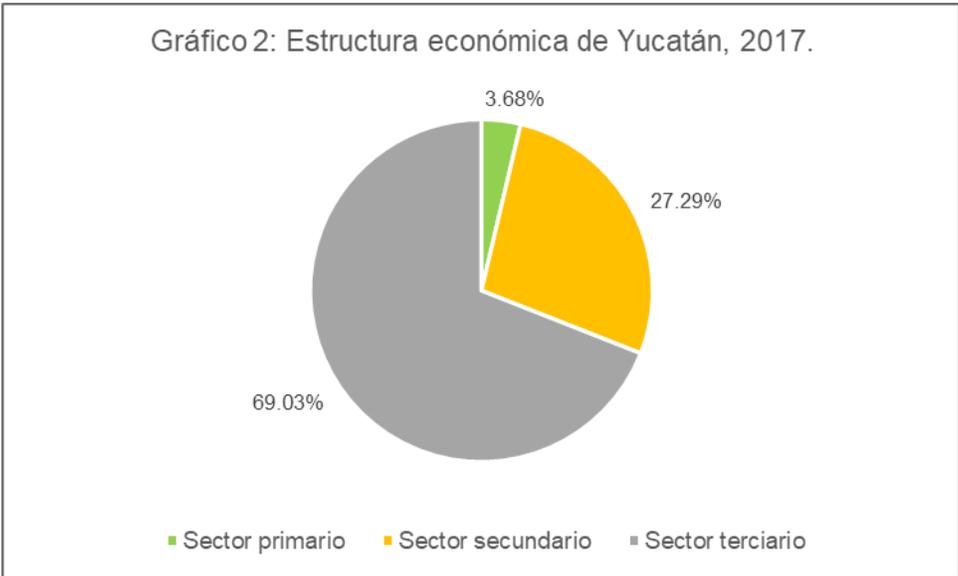


Gráfico 2.2. Estructura económica durante el año 2017 en Yucatán. Elaboración propia con datos de INEGI.

Capítulo 3. Metodología

En años recientes la detección de cambios en la vegetación con el procesamiento de imágenes satelitales y técnicas de percepción remota (PR), ha permitido obtener mejores resultados ya que se tiene una revisión temporal continua y a bajo costo de los fenómenos geográficos. Existe una gran variedad de productos satelitales como imágenes ópticas (Landsat, Spot, Sentinel, Modis, por mencionar algunos), de radar o meteorológicas (Meteosat, GOES, por mencionar algunos), así como de métodos para la detección de cambios como las Tasas de cambio, álgebra de mapas, clasificación de imágenes, entre otros. El uso de estos depende del objetivo y productos con los que cuente el usuario.

La detección de cambios mediante métodos sencillos como la comparación visual de imágenes o más complejos como la segmentación de estas requieren cierto tiempo y complejidad, esto puede provocar omisiones y/o errores en la detección. Por lo anterior, se han creado distintos softwares y herramientas para el procesamiento digital de imágenes satelitales como “Image Change Workflow” (ICW) del software ENVI, el cual es una herramienta que funciona como un flujo de trabajo automatizado para la detección de cambios en imágenes satelitales.

La metodología empleada para la realización de este trabajo consistió en cinco pasos como lo muestra el gráfico 3.1:

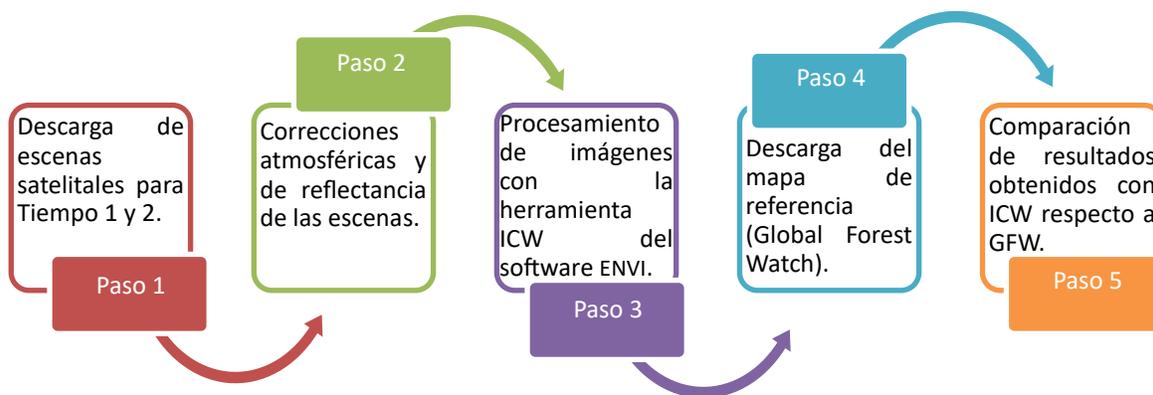


Gráfico 3.1. Metodología empleada. Elaboración propia.

Como primer paso se estableció la temporalidad de estudio que va del 2018 al 2019 para la búsqueda y descarga de imágenes satelitales que cubren el área de interés, las cuales fueron del satélite Landsat-8 debido a que son de acceso libre, cubren el área de estudio y se encuentran disponibles para la temporalidad de interés; una vez descargadas las escenas satelitales se realizó el segundo paso que consistió en las correcciones o ajustes previos de errores por la captura (calibración radiométrica, corrección atmosférica y reflectancia normalizada) los cuales se realizaron con módulos en ENVI con el objetivo de tener productos aptos para el procesamiento, a este paso lo hemos llamado “pre-procesamiento”. Una vez realizadas las correcciones, se procedió al procesamiento de las escenas ajustadas con ayuda de la herramienta ICW del software ENVI para la detección de cambios en el tiempo con la técnica de umbralización. Los resultados obtenidos nos guiaron a la identificación de zonas con posibles cambios en la vegetación, sin embargo, fue necesario calcular la sobreestimación de nuestros resultados, por lo que se compararon

con el mapa de pérdida de cobertura que provee la plataforma Global Forest Watch, siendo este nuestro último paso en el flujo de trabajo.

3.1. Descarga

Para el presente estudio y debido a la temporalidad y extensión del área, se utilizaron cuatro imágenes del satélite Landsat-8, estas escenas tienen una resolución espacial de 30x30m y temporal de 15 días, además son de acceso libre y se compone de 11 bandas espectrales:

Banda	Longitud de onda (µm)/ Resolución espacial
Banda 1 Coastal Aerosol	(0.43 - 0.45 µm) 30 m
Banda 2 Blue	(0.450 - 0.51 µm) 30 m
Banda 3 Green	(0.53 - 0.59 µm) 30 m
Banda 4 Red	(0.64 - 0.67 µm) 30 m
Banda 5 Near-Infrared	(0.85 - 0.88 µm) 30 m
Banda 6 SWIR 1	(1.57 - 1.65 µm) 30 m
Banda 7 SWIR 2	(2.11 - 2.29 µm) 30 m
Banda 8 Panchromatic (PAN)	(0.50 - 0.68 µm) 15 m
Banda 9 Cirrus	(1.36 - 1.38 µm) 30 m
Banda 10 TIRS 1	(10.6 - 11.19 µm) 100 m
Banda 11 TIRS 2	(11.5 - 12.51 µm) 100 m

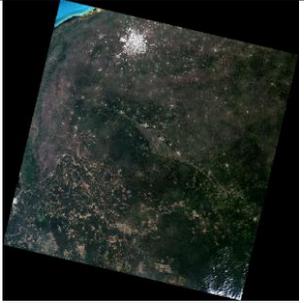
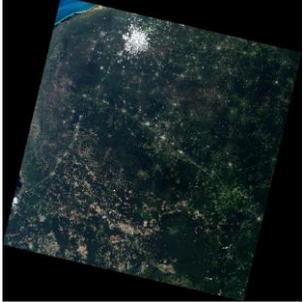
Cuadro 3.1. Bandas espectrales del satélite Landsat-8. Elaboración propia con datos de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) es quizá la plataforma más reconocida para la descarga de imágenes Landsat, sin embargo, no siempre tiene imágenes disponibles para su descarga, por lo que se optó realizar la búsqueda y descarga de estas fechas en el sitio web de *Landsatlook Viewer* (<http://landsatlook.usgs.gov/Welcome.html>),

la cual es un herramienta de rápida visualización y acceso a los datos del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), es más amigable y atractiva que la plataforma convencional ya que no requiere un registro para acceder a la información.

El estado de Yucatán se cubre por un mosaico de 4 imágenes Landsat de las cuales, por la distribución de los participantes en la entidad, se ocuparon dos: 020-045 para la parte norte y 020-046 para la parte sur. Como siguiente paso, se procedió a definir la temporalidad de las escenas las cuales deben ser una antes del año de la implementación de Sembrando Vida, esto con la finalidad de conocer el estatus de la vegetación antes del funcionamiento del programa, por lo que el Tiempo 1 (T1) corresponde al año 2018; como segunda fecha, se buscó una escena capturada un año después de la puesta en marcha de los apoyos por lo que el Tiempo 2 (T2) corresponde al año 2019, en la siguiente tabla se muestra la temporalidad y escenas descargadas para este estudio.

	Fila / Columna	Fecha de adquisición	Imagen
Tiempo 1 (T1)	020 / 045	2018-02-20	

	Fila / Columna	Fecha de adquisición	Imagen
Tiempo 1 (T1)	020 / 046	2018-02-20	
Tiempo 2 (T2)	020 / 045	2019-12-17	
	020 / 046	2019-12-17	

Cuadro 3.2. Escenas Landsat utilizadas. Elaboración propia.

3.2. Correcciones

El uso correcto de productos satelitales para su procesamiento y análisis requiere de ajustes o correcciones que buscan eliminar anomalías que afectan la calidad de la información, con el objetivo de disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea (Chuvienco, 2015). La interacción entre el sensor de captura y los objetos capturados puede provocar alteraciones en los valores y posición de los píxeles, por lo que es necesario realizar un pre-procesamiento antes de su uso. Estas afectaciones son

clasificadas en cuatro categorías principales: a) por la plataforma, b) por la rotación terrestre, c) por el sensor y d) por la atmósfera; ahora bien, para corregir los errores anteriores existen tres correcciones principales: 1) corrección geométrica, 2) corrección atmosférica y 3) corrección o calibración radiométrica.

Utilizar imágenes satelitales en estudios multitemporales como es el caso de la presente tesis, conlleva realizar algunos ajustes previos en los valores de los píxeles de las escenas ya que el formato en el que se encuentran originalmente no permite que sean comparables. Dichos ajustes están enfocados a corregir errores que surgen en el momento de la captura de información.

Recordemos que las imágenes descargadas fueron del satélite Landsat-8 disponibles con un nivel de “pre-procesamiento” L1, es importante conocer con claridad el nivel de pre-procesamiento en el que se encuentran las escenas al momento de su descarga, ya que esto nos permitirá definir qué correcciones se aplicarán previo a su tratamiento, en el caso de Landsat existen principalmente dos niveles el L1 y L2. El nivel 1, hace referencia a que la imagen descargada incluye una corrección de precisión del terreno, es decir, la imagen está calibrada radiométricamente y ortorrectificada utilizando puntos de control terrestre y datos del modelo de elevación digital para corregir el desplazamiento del relieve. Debido al nivel de pre-procesamiento que contienen las escenas, como siguiente paso se procederá a las correcciones radiométricas, atmosféricas y normalización de estas con ayuda del software ENVI.

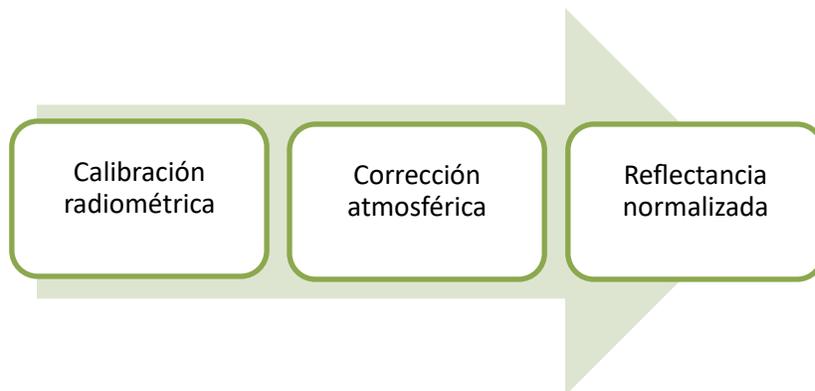


Gráfico 3.2. Pre-procesamiento aplicado a las escenas utilizadas. Elaboración propia.

3.2.1. Calibración radiométrica

El proceso de captura de información se da a través de la radiación electromagnética, es decir, la energía o luz que emite el sol (fuente externa) o la que refleja el mismo sensor (fuente interna) llega a la superficie terrestre la cual choca con los objetos que se encuentran a su paso, esta energía es reflejada y capturada por el sensor del satélite, a este proceso se le suma la energía dispersada y reflejada por la atmósfera.

La información capturada por el sensor es transformada y almacenada en valores de ND (números digitales), cada píxel que compone la imagen contiene estos valores digitales los cuales no pueden ser utilizados para algún tipo de análisis más que para visualización, por lo que es necesario transformarlos a una escala espectral normalizada (Edwards, 1998 en Aguilar, **et al.**, 2014) o a valores de radiancia. La figura 3.1 muestra los valores de ND en los que se encuentran los píxeles de la escena satelital original previo a las correcciones correspondientes.

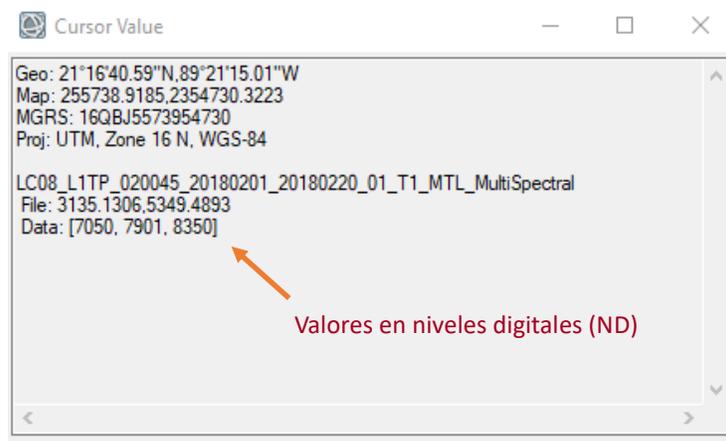


Figura 3.1. Valores en Niveles Digitales (ND) de la escena 020/045 del Tiempo 1 (T1). Elaboración propia.

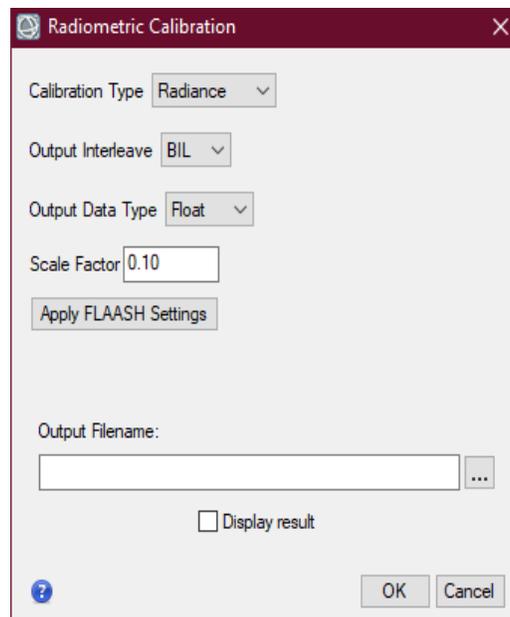


Figura 3.2. Herramienta para la corrección radiométrica en ENVI. Elaboración propia.

La corrección radiométrica de nuestras escenas se realizó con la herramienta *Radiometric calibration* que se encuentra en el software ENVI, el proceso fue aplicado sobre la imagen multiespectral que se obtiene del archivo con extensión MTL que corresponde al formato de imágenes con metadatos incluidos en el caso de Landsat. En el primer paso se seleccionó el tipo de calibración la cual fue radiancia, ya que como se mencionó anteriormente, se busca convertir los ND a radiancia; y como segundo paso se aplicaron

los ajustes para FLAASH ya que el archivo resultante se utilizará como entrada para aplicar la corrección atmosférica, estos ajustes transformaron la codificación de la imagen al formato BIL (intervalo de banda por línea) el cual es requerido para aplicar la siguiente corrección. El resultado obtenido se muestra a continuación, la escena pasó de conformarse por números digitales a valores de radiancia.

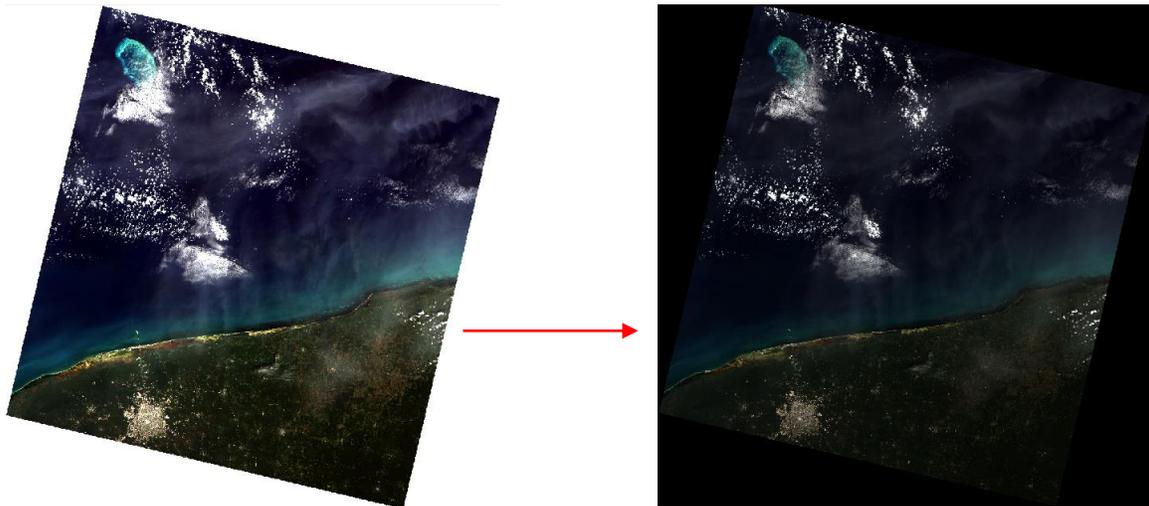


Figura 3.3. Escena 020/045 del Tiempo 1 (T1) corregida radiométricamente. Elaboración propia.

Una vez realizada la corrección radiométrica los valores de los pixeles que conforman la imagen pasan de ND a valores de radiancia como lo muestra la siguiente imagen.

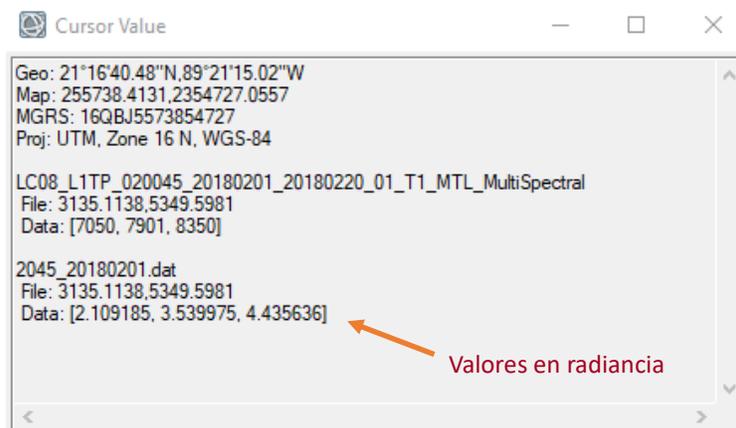


Figura 3.4. Valores en radiancia de la escena 020/045 del Tiempo 1 (T1). Elaboración propia.

3.2.2. Corrección atmosférica

La información de las escenas se puede ver alterada debido a los componentes que se encuentran en la atmósfera como aerosoles y vapor de agua disperso, sumado a esto pueden existir zonas más afectadas que otras ya que la dispersión atmosférica no es homogénea en la imagen. La corrección atmosférica busca disminuir o eliminar las distorsiones que se introducen en las imágenes producto de la interacción de la atmósfera con el sensor (Aguilar, **et al.**, 2014), dicha corrección es necesaria emplearla cuando se busca realizar comparaciones entre bandas, cuando se busca crear modelos con parámetros físicos y cuando se realizan estudios multitemporales, tal es el caso de este estudio, ya que las distorsiones son cambiantes en el tiempo.

Ahora bien, la corrección atmosférica se clasifica principalmente en dos tipos de acuerdo con el nivel de información que se tenga de la imagen. La primera corrección está relacionada a ajustes empíricos por lo tanto son más sencillos; mientras que el segundo tipo se refiere a los modelos físicos de transferencia radiativa el cual consiste en simular las condiciones atmosféricas en que fue tomada la imagen basada en los metadatos de la propia imagen y en modelos atmosféricos (Aguilar, **et al.**, 2014).

La herramienta *FLAASH* (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes, por sus siglas en inglés) del software ENVI está diseñada para la corrección atmosférica de imágenes satelitales a partir del algoritmo MODTRAN4 (MODerate resolution

atmosphericTRANsmission, por sus siglas en inglés), y utilizado para corregir las distorsiones por la atmósfera en nuestras escenas.

Es importante comprender el procedimiento que conlleva la corrección en FLAASH, en el primer paso se establece la escala para la calibración la cual fue de 1. Como segundo paso se asigna la imagen de entrada a corregir en valores de radiancia, previamente transformada, así como el directorio para guardar los resultados en reflectancia y los archivos de FLAASH. El tercer paso consistió en la incorporación de los metadatos que caracterizan a la escena como el tipo de sensor, la fecha y hora de captura, las coordenadas, tamaño de píxel, entre otros, algunos de estos datos suelen establecerse automáticamente, de lo contrario pueden encontrarse en el documento de texto que acompaña las bandas. La selección del modelo atmosférico y de aerosol, así como la visibilidad fue el cuarto paso realizado, estos modelos dependen de las condiciones de la imagen y de las condiciones climatológicas del área capturada, FLAASH propone los siguientes modelos con base en el vapor de agua y temperatura del aire superficial:

Modelo atmosférico	Vapor de agua (std atm-cm)	Vapor de agua (g/cm²)	Temperatura del aire superficial
Sub-Arctic Winter (SAW)	518	0.42	-16° C (3° F)
Mid-Latitude Winter (MLW)	1060	0.85	-1° C (30° F)
U.S. Standard (US)	1762	1.42	15° C (59° F)
Sub-Arctic Summer (SAS)	2589	2.08	14° C (57° F)

Mid-Latitude Summer (MLS)	3636	2.92	21° C (70° F)
Tropical (T)	5119	4.11	27° C (80° F)

Tabla 3.1. Tipos de modelos atmosféricos y sus características. Elaboración propia, con datos de file:///C:/Program%20Files/Exelis/ENVI53/help/ENVIHelp.htm#PreprocessImagery/QUAC_FLAASH/FLAASH.htm#Select2.

Mientras que para la selección del modelo de aerosol se tienen las siguientes características:

Modelo de aerosol	Características
Rural	1. Áreas poco afectadas por la urbanización o industria. 2. Las partículas de aerosol son una combinación de tamaño grande y pequeñas.
Urbano	3. Apropiado para zonas urbanas/industriales de alta intensidad.
Marítimo	4. Apto para representar zonas continentales con viento proveniente del océano o áreas oceánicas.
Troposférico	5. Para condiciones de calma y zonas despejadas.

Cuadro 3.3. Tipos de modelos de aerosoles y sus características. Elaboración propia, con datos de file:///C:/Program%20Files/Exelis/ENVI53/help/ENVIHelp.htm#PreprocessImagery/QUAC_FLAASH/FLAASH.htm#Select4.

Para una mayor precisión en los resultados, se realizó el último paso con la configuración multiespectral el cual se utiliza cuando el sensor de captura es de tipo multiespectral, en este paso se asignaron las bandas para cuerpos de agua y aerosoles.

A continuación, se muestra una de las escenas previa a la corrección atmosférica aplicada y el resultado de este proceso:

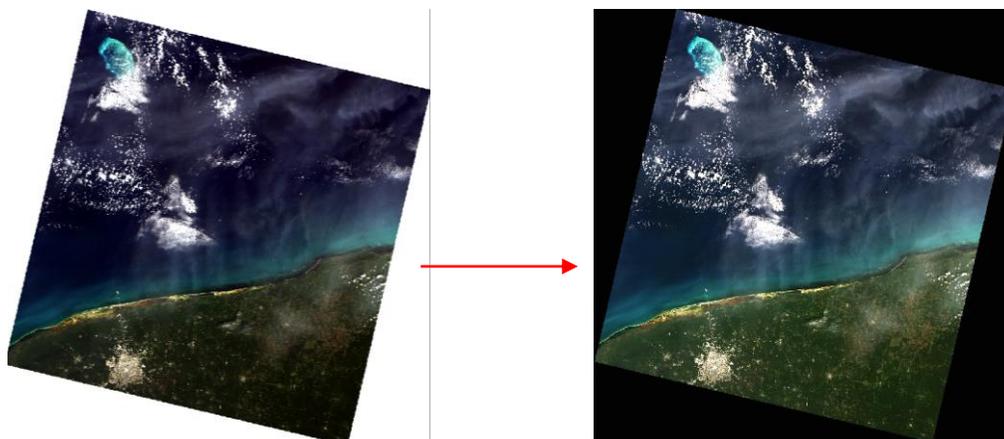


Figura 3.5. Escena 020/045 del Tiempo 1 (T1) corregida atmosféricamente. Elaboración propia.

Podemos observar en la figura 3.6 que los valores de la escena satelital pasaron de radiancia a valores de reflectancia que se distribuyen en un rango de valores negativos hasta 10000, por lo que es necesario normalizarlos.

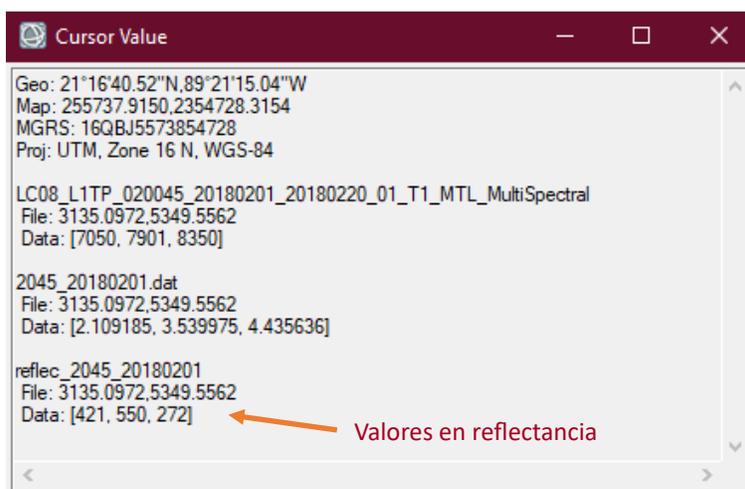


Figura 3.6. Valores en reflectancia de la escena 020/045 del Tiempo 1 (T1). Elaboración propia.

3.2.3. Reflectancia normalizada

Las correcciones realizadas a las escenas hasta el momento permiten su uso para procesamientos o análisis multitemporal que buscamos desarrollar, sin embargo, los valores de reflectancia resultante con la corrección anterior oscilan en un rango de valores

negativos hasta 10000 por lo que es necesario normalizarlos para que el rango final sea entre 0 y 1 y así eliminar los valores negativos.

Para normalizar la reflectancia obtenida de las escenas con FLAASH se utilizó la herramienta *Band math* de ENVI, la cual funciona como una calculadora de bandas donde se pueden realizar operaciones sobre las bandas que componen la imagen satelital. La ecuación 3.1 fue aplicada a todas las bandas de la imagen para transformar los valores a un rango sin negativos que van de 0 a 1, el primer paso consistió en agregar la expresión en band math y como segundo paso se eligieron las bandas multiespectrales que serían normalizadas.

Ecuación 3. 1:

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

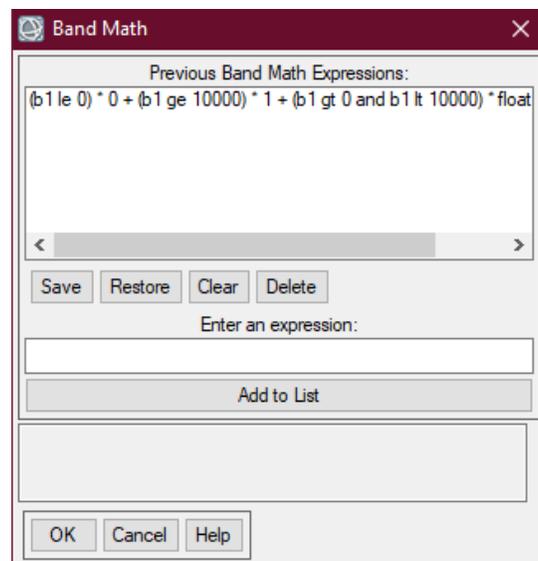


Figura 3.7. Herramienta de calculadora de bandas en ENVI para normalizar los valores de reflectancia de las escenas. Elaboración propia.

El resultado que se obtuvo con *Band math* fue un archivo que contiene todas las bandas normalizadas que conforman la escena satelital, la siguiente imagen muestra los valores de reflectancia normalizados en un rango entre 0 y 1 dónde ya no existen números negativos por lo que las imágenes se encuentran listas para su uso.

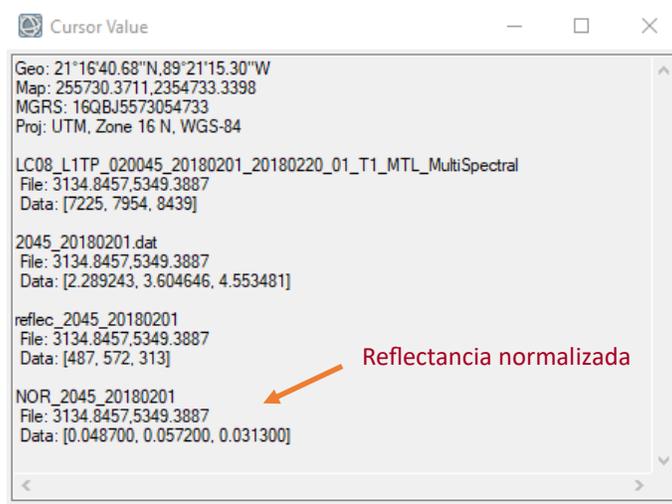


Figura 3.8. Valores de reflectancia normalizada de la escena 020/045 del Tiempo 1 (T1). Elaboración propia.

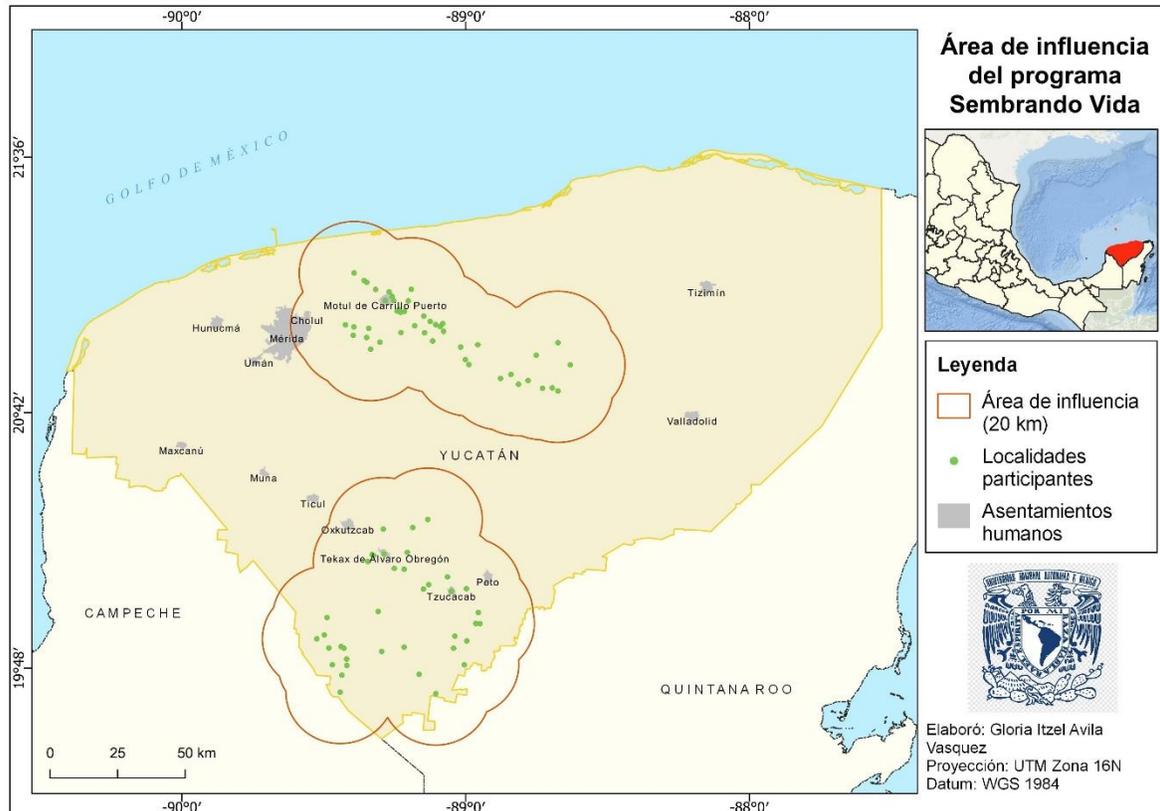
3.3. Procesamiento de imágenes satelitales con Image Change Workflow (ICW)

La selección del umbral es el paso más importante en la segmentación de una imagen ya que este clasificará los valores del píxel y, para el desarrollo de esta tesis, nos guiará a la identificación de posibles cambios de vegetación.

El módulo *Image Change Workflow* (ICW) de ENVI fue la herramienta que ofrece los mejores resultados para la detección de cambios por umbralización, identifica las diferencias entre dos imágenes capturadas en distinta temporalidad a partir de distintos “métodos de diferencia” y umbrales. Los productos que se utilizaron en el empleo de ICW

fueron las cuatro escenas previamente corregidas y normalizadas, es importante que los archivos se encuentren corregidos espacial y radiométricamente para tener una mejor precisión en la ubicación de los píxeles con cambios en ambos tiempos; las localidades participantes que se encuentran únicamente dentro del área que cubren las escenas satelitales, las cuales son 83 en total y por último el área de influencia del programa.

Como primer paso, se seleccionó la escena para el primer y segundo tiempo de la misma área, por lo que se trabajó primero con las escenas 020/045 del 2018 y 2019 después, se realizó el mismo procedimiento para las escenas 020/046 del 2018 y 2019. En esta primera ventana del ICW se tiene disponible la opción de trabajar con una máscara o región de interés (ROI) para que el proceso sea aplicado únicamente para el área indicada, en nuestro caso, generamos un “buffer o área de influencia” de máximo 20 kilómetros de distancia a partir de cada localidad participante debido a las especificaciones del programa las cuales establecen esta distancia entre la vivienda del beneficiario y la unidad de producción. En el mapa 3.1, las localidades participantes dentro de nuestras escenas están representadas con los puntos en color verde, mientras que el área de influencia se muestra con la línea en color rojo.



Mapa 3.1. Área de influencia del programa Sembrando Vida. Elaboración propia.

Como segundo paso tenemos la opción de registrar las imágenes automáticamente, es decir, serán alineadas geométricamente cuando tienen diferente geometría y/o distorsiones en el terreno a pesar de encontrarse en el mismo sistema de coordenadas, debido a que nuestras escenas ya cuentan con una corrección y por el tiempo que requiere este proceso, se optó por omitir este registro automático.

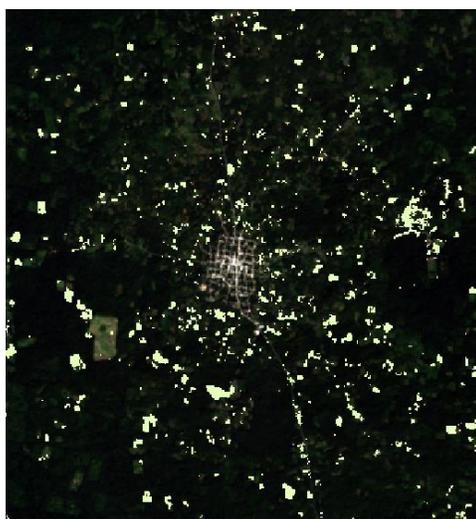
Existen distintos métodos de diferencia como se mencionó anteriormente, en el caso de ICW se pueden elegir dos, Diferencia de imagen o Transformación de la imagen, para nuestro objetivo se optó por el primer método. El método seleccionado ofrece tres tipos de diferencias las cuales son por la banda de entrada, por el ángulo espectral y por un índice

de diferencia, debido a las características de nuestras escenas se eligió trabajar con el índice de diferencia. Ahora bien, el índice que mejor se ajusta a nuestros productos fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) el cual identifica la biomasa fotosintéticamente activa de la vegetación o bien de forma general, es un indicador de la salud de la vegetación. El NDVI es un indicador de cambios o diferencias en los valores de reflectancia o de salud en la vegetación, por ejemplo, si un píxel en T1 tiene un valor de NDVI de entre 0.70 y 0.80 se espera que para el T2 este valor se mantenga, en caso contrario se puede inferir que en ese píxel hay un cambio.

Como siguiente paso en la metodología antes de exportar los resultados, consistió en la elección del umbral para la clasificación o segmentación de la imagen, para fines de la presente tesis se utilizaron los 4 umbrales que ofrece ICW: Tsai el cuál buscó similitudes entre los píxeles para la clasificación; Otsu utilizó la forma del histograma de las imágenes para identificar cambios; Kittler a partir de dos funciones gaussianas clasificó el histograma y discriminó los píxeles con cambio respecto al fondo y por último Kapur al igual que el umbral anterior, clasifica los píxeles en “píxeles de interés” es decir los que presentan cambios y “píxeles del fondo”, a partir de la entropía de estos. Los resultados obtenidos fueron exportados en un formato shapefile para visualizarlos en un software SIG, así como Tiff y un txt con las estadísticas de los píxeles clasificados.

Una vez obtenidas las capas en formato shapefile por cada uno de los umbrales aplicados, a dichas capas fue necesario aplicar una limpieza de aquellos polígonos que representan

cambios en áreas urbanas o de construcción, cuerpos de agua, carreteras o caminos, así como de polígonos que son afectados por la nubosidad, con el objetivo de mantener el mayor número posible de polígonos que representan únicamente cambios en la vegetación y no tener inconsistencias en los polígonos para su comparación con el mapa de pérdida de cobertura forestal de GFW.



a) Polígonos obtenidos del umbral Kittler



b) Polígonos obtenidos del umbral Otsu



c) Polígonos obtenidos del umbral Tsai



d) Polígonos obtenidos del umbral Kapur

Figura 3.9. Polígonos obtenidos en una misma zona de la escena 020/046 por cada umbral utilizado.

3.4. Global Forest Watch (GFW)

La pérdida de vegetación en el mundo es un problema que ha despertado el interés en la agenda internacional por lo que se han creado varios sistemas de monitoreo tanto locales como internacionales para la supervisión de esta. El monitoreo histórico y a distancia de la pérdida de vegetación es una herramienta de gran utilidad para identificar y calcular las áreas de atención, así como para conocer los factores que inciden en la disminución. Así como existen diversos productos satelitales utilizados para la observación del planeta, se han creado plataformas para el monitoreo de la vegetación en tiempo real como Global Foresta Watch (GFW) (<https://www.globalforestwatch.org/>).

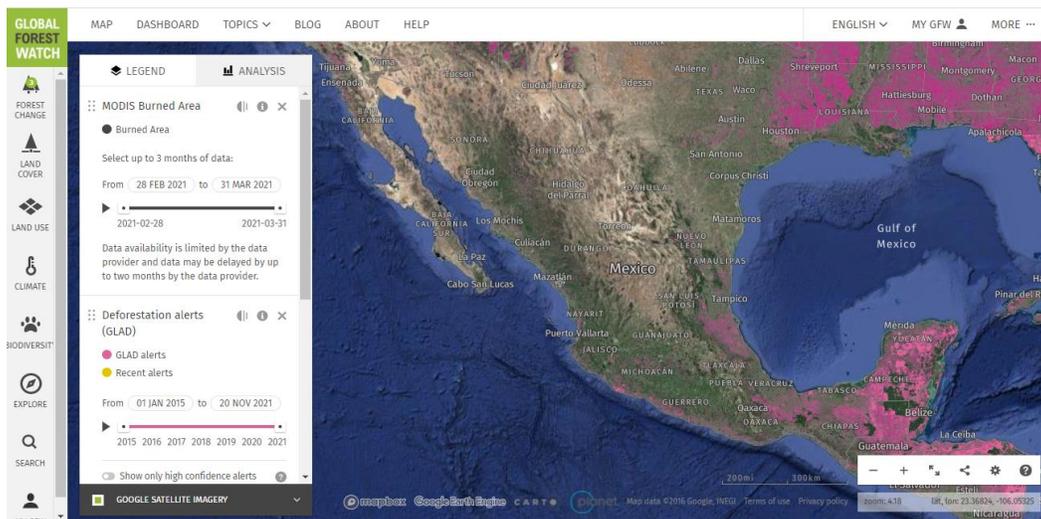


Figura 3.10. Portal de Global Forest Watch (GFW) para la descarga de información sobre la pérdida de cobertura arbórea. Fuente: <https://www.globalforestwatch.org/>.

GFW inició originalmente en 1997 como una iniciativa del World Resources Institute (WRI) y otros socios, a medida que la conectividad a nivel global fue aumentando y nuevas tecnologías se fueron desarrollando WRI inició una nueva etapa (Valarezo, 2016) en 2014.

La plataforma GFW funciona como una herramienta para el monitoreo del estado de la cobertura arbórea, específicamente de los bosques del mundo, con el objetivo de brindar a la población mundial un sitio web en constante actualización y de fácil uso para conocer, conservar y monitorear los bosques a nivel global, además, GFW involucra a los usuarios aportando estudios y conocimientos para crecer el contenido del sitio. Entre los aplicativos que GFW ha desarrollado se encuentra GFW Commodities para evaluar la sostenibilidad en la cadena de suministros básicos; GFW Fires para monitorear incendios forestales y terrestres; alertas de deforestación mensuales y semanales; Forest Watcher el cual es un aplicativo móvil para llevar a campo; aumento de la cobertura arbórea; factores que inciden en la pérdida de cobertura arbórea y recientemente GFW Pro.

La pérdida de la cobertura forestal es uno de los productos más consultados en el portal de GFW y el utilizado para este estudio como un mapa comparativo contra los resultados obtenidos de nuestra metodología. Este producto muestra las áreas de pérdida bruta de cobertura arbórea; se encuentra disponible desde el año 2001 al 2020, en nuestro caso utilizamos la temporalidad 2018 y 2019 para T1 y T2 respectivamente por lo que la temporalidad si puede ser comparable; la resolución espacial es de 30x30 m ya que es obtenido a partir de imágenes Landsat por lo que también puede ser comparable con los productos que utilizamos. Es importante mencionar que GFW considera a la “cobertura arbórea” como toda la vegetación de más de 5 metros de altura por lo que puede ser desde un bosque natural o plantaciones en una variedad de densidades de copas; “Pérdida” indica

la remoción o mortalidad de la cobertura arbórea y puede deberse a una variedad de factores, por lo que para este sistema "pérdida" no equivale a deforestación estrictamente.

La plataforma ofrece diferentes conjuntos de datos los cuales, para su descarga, dividen al planeta en mosaicos de 10x10 grados, cada uno de estos consta de siete archivos disponibles para descargar. Todos los archivos contienen valores de 8 bits sin firmar y tienen una resolución espacial de aproximadamente 30 metros por píxel. El archivo descargado para este trabajo fue el formato tif llamado "lossyear" el cual corresponde a la pérdida de bosque durante el período 2000–2020, el rango de valores en los datos va de 0 a 20, donde 0 corresponde a áreas sin pérdida y de 1 a 20 representa la pérdida detectada del año 2001-2020, respectivamente. Este formato tif fue convertido a un archivo shapefile y del cual fueron extraídos los polígonos correspondientes a la temporalidad 2018 y 2019, para ser utilizado con nuestra capa vectorial obtenida de ICW.

3.5. Cruce de información

Los procesos realizados anteriormente dieron como resultado dos archivos principales y los cuales, fueron utilizados para realizar el último paso en la metodología que consiste en la sobreposición o cruce de información para calcular el porcentaje de coincidencia y el nivel de sobreestimación.

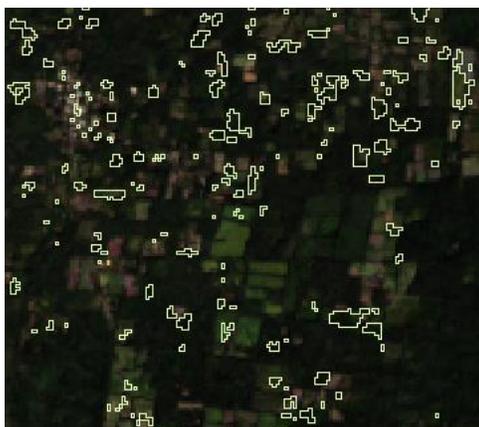
Primero recordemos que, por un lado, tenemos ocho archivos vectoriales que se obtuvieron del ICW de ENVI, esto debido a que se procesaron dos escenas satelitales (020/045 y

020/046) para los cuatro umbrales que ofrece esta herramienta, por lo que, de cada umbral se obtuvieron dos capas shapefile, como lo muestra el cuadro 3.4.

Umbral	Escena
Kapur	020 / 045
	020 / 046
Kittler	020 / 045
	020 / 046
Otsu	020 / 045
	020 / 046
Tsai	020 / 045
	020 / 046

Cuadro 3.4. Escenas procesadas en relación con el umbral establecido.

El segundo archivo corresponde a la plataforma GFW, ya que el TIF que proporciona dicho visualizador fue transformado a una capa shapefile para que pudiera ser utilizada con las capas mencionadas anteriormente, con fines de representación únicamente se ejemplificó con el umbral Kittler las capas mencionadas en la figura 3.11.



a) Polígonos correspondientes al umbral Kittler



b) Polígonos correspondientes a GFW

Figura 3.11. Productos utilizados. a) polígonos resultantes del procesamiento de la escena 020/046 con el umbral Kittler; b) polígonos obtenidos de la transformación del archivo TIF que proporciona la plataforma GFW.

Una vez identificados los productos, se realizó el cruce de información o unión espacial entre cada una de las ocho capas con la de GFW, este proceso se realizó con ayuda de la herramienta “unión espacial” de un SIG. Esta herramienta une atributos de una capa a otra, o como le llaman “entidad de unión” (shapefile resultante del módulo ICW por umbral) y “entidad de destino” (capa de pérdida de cobertura del GFW), en función de la relación espacial, las entidades que coinciden espacialmente reciben la categoría de “1” mientras que los polígonos que no convergen espacialmente son clasificados con “0”, en la “entidad de salida”, en la figura 3.12 se muestran el resultado de la unión espacial entre la entidad de unión y la de destino.

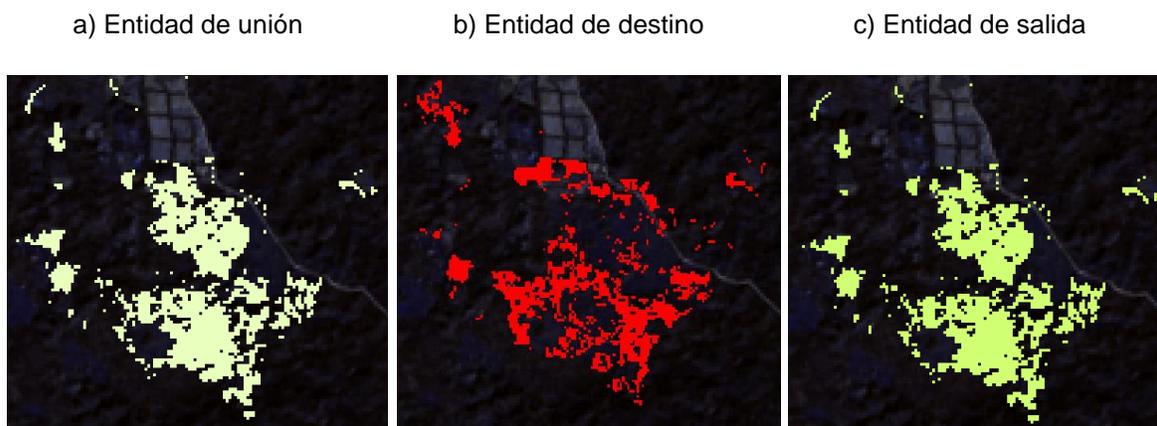


Figura 3.12. Archivos utilizados en el proceso de unión espacial. *a) Entidad de unión*, es el shapefile resultante del proceso de ICW para cada umbral (se tuvieron ocho entidades de unión en total), y la cual fue utilizada como la capa de entrada o la que se unió a la entidad de destino; *b) Entidad de destino* es la capa de pérdida de cobertura forestal del GFW y es la capa a la que se unió la entidad de unión (solo se tiene una entidad de destino total); *c) Entidad de salida* es el resultado de la unión espacial de las entidades anteriores, en esta los polígonos que coinciden espacialmente en ambas capas son clasificados con “1”.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Resultados

Segmentar una imagen, en nuestro caso con la técnica de umbralización, puede demandar tiempo si se establece el umbral de forma manual, sin embargo, gracias al módulo que ofrece el software ENVI y el cual fue utilizado para los objetivos de esta tesis, permitió que este proceso se realizara de forma rápida y automática. Recordemos que los resultados de este proceso fueron ocho archivos de tipo shapefile, dos por cada uno de los umbrales, los cuales contienen los polígonos que presentan cambios o diferencias de NDVI y son interpretadas como cambios en la vegetación de un tiempo a otro, es importante mencionar que para el análisis de los resultados se optó por utilizar el número de polígonos en lugar de la superficie por la diversidad de esta misma.

Previamente al proceso de unión espacial en el SIG, fue necesario conocer la estructura de la información que contienen las capas que se utilizaron en este paso, es decir, el número de polígonos y superficie que conforman los ocho archivos shapefile obtenidos del proceso de ICW, que llamaremos “umbrales”, y la capa de GFW o “mapa base”, el cual será utilizado como un comparativo para calcular el porcentaje de coincidencia y la sobreestimación de los umbrales a través de la unión espacial.

En la tabla 4.1 se muestra el número de polígonos y superficie que se obtuvo en cada umbral y del mapa base, como un primer resultado, vemos que el umbral que arrojó un mayor número de polígonos con cambios fue el de Kittler en ambas escenas mientras que

el menor fue Kapur para la escena 020/045 y Otsu para la escena 020/046, recordemos que este número de polígonos pertenece a las capas obtenidas del proceso de ICW. Respecto al mapa base de GFW, reportó un total de 25,896 polígonos con pérdida de cobertura entre los años 2018 y 2019.

Capa	Núm. de polígonos con cambio	Superficie total (ha)
Kapur 020 / 045	262	92.43
Kapur 020 / 046	3,827	4,368.42
Kittler 020 / 045	18,063	16,883.19
Kittler 020 / 046	38,618	37,488.15
Otsu 020 / 045	2,691	1,346.22
Otsu 020 / 046	2,271	2,568.69
Tsai 020 / 045	4,410	2,446.92
Tsai 020 / 046	5,647	6,306.12
Capa de perdida de cobertura de GFW	25,896	18,986.67

Tabla 4.1. Numero de polígonos y su equivalente en superficie (hectáreas) que conforman cada capa del proceso de ICW y GFW.

El número de polígonos obtenidos de cada umbral nos muestra que a) el umbral que logró identificar un mayor número de polígonos con variaciones en los valores de NDVI (lo que interpretamos como cambio) en ambas escenas fue el de Kittler, mientras que con el umbral Kapur se encontraron menos entidades con cambio en sus valores de NDVI. Sin embargo, para conocer a mayor detalle la precisión en los datos se optó por comparar los resultados con el mapa base a través de una unión espacial de entidades.

El proceso de unión espacial entre los umbrales, llamadas entidades de unión para este proceso, y la entidad de destino (mapa base) permitió tener una capa de salida con los polígonos coincidentes y no coincidentes entre ambos archivos, por ejemplo, al unir el umbral Otsu con el mapa base el resultado contiene los polígonos que coinciden espacialmente en ambos archivos, pero también aquellos que no tienen una superposición espacial. Replicando el ejemplo anterior con todos los umbrales, se identificó que los resultados tuvieron un aumento en el número de polígonos ya que pueden coincidir con más de un polígono del mapa base. La tabla 4.2 muestra el número de polígonos que se obtuvieron en cada entidad de salida, por ejemplo, en la tabla 1 vimos que el número de polígonos para el umbral Otsu-020/045 fue de 2,691, con el proceso de unión espacial con el mapa base el número de polígonos pasó a 4,720 esto debido a que algunos coincidieron con más de una entidad del mapa base, además de la incorporación de los que no coincidieron, esto sucede con todas las entidades de salida.

Umbral	Escena	Núm. de polígonos en la entidad de salida
Kapur	020 / 045	414
	020 / 046	6,954
Kittler	020 / 045	23,379
	020 / 046	57,774
Otsu	020 / 045	4,720
	020 / 046	4,073
Tsai	020 / 045	6,536
	020 / 046	10,252

Tabla 4.2. Numero de polígonos obtenidos del proceso de unión espacial entre las entidades de unión y destino.

Las cifras incorporadas en la tabla 4.2 son el total de polígonos en cada entidad de salida, es decir, incorpora los polígonos coincidentes y no coincidentes espacialmente por lo que

fue necesario extraer los polígonos que sí coincidieron de aquellos que no presentaron coincidencias. Por lo anterior en la tabla 4.3 se muestra únicamente el total de polígonos coincidentes espacialmente entre la entidad de unión y de destino.

Umbral	Escena	Núm. de polígonos coincidentes con GFW
Kapur	020 / 045	287
	020 / 046	5,377
Kittler	020 / 045	10,067
	020 / 046	34,576
Otsu	020 / 045	3,646
	020 / 046	3,073
Tsai	020 / 045	3,829
	020 / 046	7,998

Tabla 4.3. Numero de polígonos coincidentes espacialmente entre las capas de unión y la capa de destino.

Como un segundo análisis de los resultados, podemos ver que el mayor número de polígonos coincidentes entre la entidad de unión y la de destino se presentó con el umbral de Kittler ya que obtuvimos un total de 44,643 polígonos que se sobreponen con el mapa base. En el caso del umbral Kapur fue este el que presentó un menor número de coincidencias, se encontraron únicamente 5,664 debemos considerar que esto se ve influenciado por la cantidad de polígonos que se obtuvo desde el proceso de umbralización como se indica en la tabla 4.1.

La unión espacial entre las entidades de unión y la de destino se realizó con el objetivo de evaluar la precisión de los umbrales en la identificación de píxeles con cambio en sus valores de NDVI, lo cual nos indica posibles cambios. Los polígonos del mapa base de GFW fueron utilizados como una base de comparación por su nivel de detalle y precisión en los

datos. Con los resultados de la tabla 4.3, también podemos ver que b) el umbral de Kittler, hasta el momento ha presentado un mayor número de coincidencias respecto al mapa base de GFW.

El análisis de los resultados se ha realizado a partir de la contabilización de polígonos coincidentes entre los umbrales y el mapa base, sin embargo, es necesario calcular el porcentaje de coincidencia de cada umbral con el objetivo de poder compararlos entre sí y conocer la sobreestimación en los datos. Para lo anterior, primero se procedió a la suma total de polígonos obtenidos en la entidad de salida por umbral, contemplando los que sí tuvieron coincidencias y los que no; así mismo se sumaron los polígonos que sí presentaron una coincidencia espacial respecto al mapa base como lo muestra la tabla 4.4.

Umbral	Núm. de polígonos en la entidad de salida por escena	Núm. total de polígonos en la entidad de salida (A)	Núm. de polígonos coincidentes con GFW por escena	Núm. total de polígonos coincidentes con GFW (B)
Kapur 020 / 045	414	7,368	287	5,664
Kapur 020 / 046	6,954		5,377	
Kittler 020 / 045	23,379	81,153	10,067	44,643
Kittler 020 / 046	57,774		34,576	
Otsu 020 / 045	4,720	8,793	3,646	6,719
Otsu 020 / 046	4,073		3,073	
Tsai 020 / 045	6,536	16,788	3,829	11,827
Tsai 020 / 046	10,252		7,998	

Tabla 4.4. Número de polígonos con cambio por umbral (entidad de unión) y; número total de polígonos espacialmente coincidentes con el mapa base.

En la tabla 4.4 en la columna A se presenta el número total de polígonos de cada entidad de salida obtenidas del proceso de unión espacial con el mapa base de GFW, que incluye las entidades que sí presentaron coincidencias, así como aquellas que no resultaron coincidentes. Podemos observar que el umbral Kittler al presentar el mayor número de polígonos con cambio, como lo muestra la tabla 4.1, tuvo el mayor número de coincidencias al unirlo con el mapa base de GFW; por el contrario, el umbral Kapur parece ser el que presenta un menor número de coincidencias respecto GFW como se indica en la columna B, sin embargo, al comparar las cifras de la columna B con el total de A consideramos necesario el cálculo del porcentaje de coincidencia de cada umbral para poder comparar su eficiencia.

Tomando en cuenta las cifras de la columna A y B, se procedió al cálculo del porcentaje de coincidencia para ello se empleó la siguiente fórmula donde:

X = Porcentaje de coincidencia
 A = Núm. total de polígonos en la entidad de salida
 B = Núm. total de polígonos coincidentes con GFW

$$X = B/A$$

Resultado de lo anterior, obtuvimos que:

Umbral	Porcentaje (%) de coincidencia espacial con la entidad de destino (GFW)
Kapur	0.77
Kittler	0.55
Otsu	0.76
Tsai	0.70

Tabla 4.5. Porcentaje de coincidencia espacial respecto al mapa base de GFW.

Los umbrales que presentaron un mayor porcentaje de coincidencia respecto al mapa base de GFW fue el umbral de Kapur con un 0.77% y Otsu con una diferencia mínima del 0.76%. Con los resultados obtenidos en la tabla 4.5 podemos observar que, a pesar de que el mayor número de polígonos coincidentes pertenece al umbral Kittler respecto al resto de umbrales, este presentó el menor porcentaje de coincidencia con 0.55%, esto debido a que de los 81,153 polígonos presentes en la entidad de salida (columna A) únicamente la mitad (44,643) coincidieron espacialmente con el mapa base; mientras que en el caso del umbral Kapur las entidades que sí coincidieron fueron 5,664 de 7,368. Estos porcentajes nos muestran que contabilizar los polígonos coincidentes no es suficiente para conocer la eficiencia de un umbral en la identificación de píxeles con cambio, fue necesario comparar las coincidencias respecto al total de polígonos unidos con el mapa base.

Como un último análisis de los resultados, se optó por cuantificar la sobreestimación de cada umbral con el objetivo de conocer si estos excedieron la identificación de cambios del mapa base. Para este proceso, al igual que el anterior, se utilizaron las mismas cifras de la columna A y B pero el orden de los factores en la ecuación fue invertido, dónde:

$$X = A/B$$

Umbral	Porcentaje (%) de sobreestimación
Kapur	130
Kittler	182
Otsu	131
Tsai	142

Tabla 4.6. Porcentaje de sobreestimación en la identificación de píxeles con cambio.

El porcentaje ideal en una estimación de datos sería 100% o cercano, sin embargo, los resultados de la tabla 4.6 nos muestran que todos los umbrales presentaron una sobreestimación en sus resultados, esto se puede confirmar con las cifras de la tabla 4.5. La sobreestimación más alta la presenta el umbral de Kittler con 82%, lo cual nos indica que el número de polígonos que se esperaba tuvieran una coincidencia espacial con el mapa base excedió el valor real, es decir, en la unión espacial entre la capa de unión y de destino se esperaba que los 81,153 polígonos fueran coincidentes sin embargo únicamente 44,643 cumplieron con esta categoría. En el caso del umbral Kapur se tuvo el valor más cercano al 100% ya que los polígonos sobreestimados como coincidentes fue únicamente de 1,074, con estas cifras observamos que de todos los umbrales fue el que presentó un mayor número de coincidencias respecto al mapa base, así como el menor porcentaje de sobreestimación.

4.2. Discusión

La discusión se desarrollará en tres apartados principales, el primero corresponde a los cuatro métodos de umbralización respecto a trabajos realizados por otros autores; la segunda discusión se enmarca a la relación de los resultados con el programa Sembrando Vida; y por último los alcances y limitantes de esta investigación.

En México, el esfuerzo científico se ha centrado en estimar las tasas de deforestación a través de los inventarios forestales, pero los estudios de cambios de uso del suelo en escalas local y regional son escasos (Galicia, **et al.**, 2007), también existen estudios que

en su mayoría utilizan metodologías de clasificación de imágenes como redes neuronales, mínima distancia y K-means, por mencionar algunos. Además, las investigaciones realizadas están enfocadas en arrojar resultados cuantitativos que no consideran los procesos sociales, por lo que se tratan de investigaciones parciales.

Respecto a los estudios realizados en relación con la segmentación de imágenes se tiene una amplia bibliografía en su mayoría de carácter computacional, diseño y hasta médico, sin embargo, son pocos los que tienen un enfoque geográfico o utilizados para la detección de cambios de vegetación como el trabajo de Riomoros Callejo (2016) dónde propone la segmentación de imágenes agrícolas a partir de su textura para obtener mejores cosechas y rendimientos, lo cual es una metodología bastante completa y específica ya que utiliza imágenes tomadas por cámaras digitales con sensores CCD (Charged Coupled Device) lo cual no es funcional para un estudio de detección de cambios a escalas grandes; o el trabajo de Osorio, **et al.**, 2014 dónde proponen un análisis y modelación de los procesos de deforestación a partir del uso de imágenes satelitales Landsat MSS, Series de Vegetación proporcionadas por INEGI y sitios de verificación a partir de una interpretación visual propuesta por la FAO, lo cual a pesar de ser una metodología acertada no puede ser aplicada en éste trabajo ya que los sitios de verificación son una limitante.

La mayoría de los estudios de segmentación, en específico los de umbralización de imágenes, utilizan el método de Otsu ya que tiene una buena respuesta frente a la mayoría de las situaciones del mundo real y no necesita supervisión (Ling y Ruzhitsky, 1996;

Shrestha **et al.**, 2004, citado por Riomoros, 2016). En esta investigación, el método que arrojó mejores resultados fue Kapur y por una pequeña diferencia le siguió Otsu, por lo anterior, la metodología y los resultados obtenidos en esta investigación son sobresalientes para los estudios futuros de detección de cambios de objetos, en particular, como una metodología para la detección de cambios de vegetación con imágenes satelitales.

En años recientes el análisis de las políticas públicas ha cobrado relevancia. Éstas han pasado de ser concebidas como únicamente una acción de gobierno, a analizarse como un proceso complejo o como un sistema en donde interviene desde la legitimidad del proceso de diseño hasta su constante evaluación (Aguilar, 2010, citado por Castro, 2016). La evaluación de las políticas ambientales o los programas de conservación como Sembrando Vida, debe realizarse de manera integral y periódicamente ya que la problemática a atender como los cambios en la vegetación no es igual en el territorio y en el tiempo.

El Programa Sembrando Vida fue implementado en 2019 y presentado como uno de los programas más importantes del sexenio en turno para apoyar a la población rural, incentivar la implementación de los sistemas agroforestales y la reforestación de bosques y selvas, además de considerar a los pequeños productores. A pesar de llevar aproximadamente 5 años en marcha son pocos los trabajos realizados al respecto y la información disponible, en su mayoría, son noticias que aseguran que Sembrando Vida carece de resultados positivos, se habla de deforestación para ser beneficiario. Un estudio realizado por Warman y colaboradores en 2021 mencionan que el Programa pudo promover una pérdida de

coberturas forestales cercana al 11.25% del total de parcelas beneficiadas para el 2019.

Por lo anterior, las técnicas de la percepción remota pueden ser una herramienta importante para la evaluación de programas que buscan la reforestación como Sembrando Vida, sin embargo, no deben ser las únicas empleadas, ya que con el desarrollo de este trabajo pudimos notar que la umbralización denota áreas con cambios, pero no pueden atribuirse al programa ya que es necesario de otros elementos (sociales, económicos, demográficos, ambientales, entre otros) para poder establecer una relación.

Las imágenes satelitales utilizadas como insumo para el desarrollo de la metodología de esta investigación son del satélite Landsat, el cual proporciona escenas con una resolución espacial de 30 metros por lo que el detalle de lo que se puede detectar es menor, esto puede ser mejorado con escenas de mayor resolución por ejemplo las del satélite Sentinel, las cuales si fueron consideradas como una primera opción, sin embargo, no pudieron ser utilizadas debido a la temporalidad en que dicho satélite comenzó a capturar imágenes de la zona de estudio la cual no coincide con los intereses de esta tesis.

Además del tipo y calidad de las escenas satelitales, la georreferenciación de las parcelas participantes sería información de mayor importancia a únicamente contar con la ubicación de la vivienda del sujeto agrario como es el caso en este trabajo, en primer lugar porque se tendrían polígonos o puntos de entrenamiento, el área de influencia estaría limitada a dichas parcelas, se podría tener una mayor correlación de los cambios detectados por los umbrales

con Sembrando Vida ya que se tendría la seguridad que dichas parcelas son utilizadas específicamente para el programa.

Global Forest Watch (GFW) ofrece datos relacionados a la pérdida de la vegetación, para nuestro estudio fue utilizado como un mapa de validación el cual aportó certidumbre a la identificación de cambios para cada uno de los umbrales. Sin embargo, consideramos que GFW presenta algunas deficiencias para validar los resultados ya que considera toda la vegetación de más de 5 metros de altura lo cual puede ser desde un bosque natural o hasta plantaciones frutales, además considera otros eventos aparte de la deforestación como causantes de pérdida de vegetación por ejemplo incendios, enfermedades, actividades antropogénicas o eventos climatológicos. Aunado a lo anterior, la actualización de la información que ofrece GFW es hasta el 2021 por lo que se vería limitado a trabajos con una temporalidad reciente.

A pesar de que existen investigaciones que aseguran que desde la implementación del programa se vio un incremento en la deforestación de la vegetación, consideramos que para mejorar el análisis 1) la temporalidad de estudio debe ser ampliada para identificar cambios considerables; 2) es necesario establecer una clasificación del NDVI que esté relacionada a cambios por deforestación porque a pesar de que ICW emplea automáticamente este índice, se pueden tener polígonos con cambios atribuidos a ganadería, crecimiento urbano, agricultura, entre otras actividades; 3) en complemento al punto anterior, es necesario considerar otros insumos como la georreferenciación de las

parcelas participantes, los cultivos o vegetación que se sembraba previo a su inscripción al programa para así poder vincular los resultados obtenidos del proceso de segmentación con el programa. El presente trabajo propone una metodología sencilla y adecuada para la detección de cambios en imágenes satelitales, sin embargo, carece de los elementos necesarios para evaluar el desempeño de Sembrando Vida.

Conclusiones

Los temas relacionados a la degradación ambiental han adquirido importancia en las agendas gubernamentales durante los últimos años, los cambios de uso de suelo y vegetación es uno de ellos, las acciones tomadas para frenarlos buscan involucrar a la población, así como a las actividades económicas con el objetivo de obtener resultados que beneficien a todos en su conjunto, sin embargo, en algunos casos, no son eficientes ya que cobra mayor relevancia el bienestar social y económico que la protección al ambiente. Por ello, es necesario evaluar y monitorear las acciones que se implementan con el objetivo de ser adecuados a cada situación.

Sembrando Vida se presenta como un programa enfocado a la recuperación y conservación del medio ambiente, contribuyendo en la generación de empleos para la población rural. Hasta el momento, son 21 entidades federativas las consideradas como áreas de cobertura con más de 455,000 beneficiarios de los cuales 4,600 participantes se encuentran en Yucatán. Al ser un programa que busca atender de manera integral la pobreza rural y la degradación ambiental a través de la siembra de sistemas productivos agroforestales, es necesario realizar una evaluación y monitoreo con enfoque socio-ecosistémico de la operatividad y resultados con el objetivo de reconocer el impacto social y ambiental que se tiene desde su implementación.

La percepción remota no solo es una herramienta que permite la captura remota de objetos, sino también se presenta como una herramienta para el monitoreo de la vegetación y con

ello evaluar las estrategias implementadas para la conservación, es así como el uso de las imágenes satelitales ha incrementado en la cuantificación y monitoreo de los cambios de uso de suelo y vegetación.

El módulo *Image Change Workflow* (ICW) del software ENVI, es una de las herramientas más utilizadas en la segmentación de imágenes permite aplicar distintos métodos de diferencia y umbrales de acuerdo con el tipo de información que se busca destacar. Debido a que el objeto a distinguir en las imágenes es la vegetación, los índices de vegetación son utilizados como un diferenciador para identificar los cambios, en este caso el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) fue el óptimo para nuestros intereses, sin embargo consideramos que es necesario establecer una clasificación del NDVI y considerar otros insumos que en conjunto denoten los cambios en la vegetación y puedan ser vinculados a Sembrando Vida ya que de lo contrario se podrían presentar falsos cambios relacionados a otras actividades.

La selección del método de umbralización es un paso importante en la segmentación de imágenes, el método de Otsu es uno de los más utilizados, sin embargo, en nuestro estudio el método de Kittler fue el que identificó un mayor número de polígonos que presentaron cambios entre el tiempo 1 y 2. Debemos considerar que la eficiencia de estos métodos no debe ser evaluada únicamente con el número de polígonos detectados, sino que también es necesario evaluar la sobreestimación de los datos y la calidad de lo detectado con un mapa de referencia por lo que el uso de Global Forest Watch (GFW) fue necesario. Con la

ayuda de GFW se concluyó que Kapur fue el método que identificó un mayor número de polígonos con cambios y pérdidas de vegetación.

En el presente trabajo se realizó una comparación entre los métodos de umbralización de imágenes con el objetivo de reconocer cuál de estos ofrece mejores resultados en la detección de cambios que, para el caso de este estudio nos interesan aquellos sucedidos desde la implementación del programa Sembrando Vida y así poder evaluar el desempeño de dicho programa. Sin embargo, no se cumplió el objetivo en su totalidad ya que a pesar de que el método mostró un buen desempeño en la detección de cambios los resultados no pudieron ser relacionados al programa ya que se necesita de otra información de tipo social, económicos, demográficos, ambientales por mencionar algunos para evaluar el desempeño de un programa federal reciente y de gran impacto como lo es Sembrando Vida. Aunado a lo anterior, este trabajo busca aportar una metodología sencilla en los estudios relacionados a la detección de cambios de uso de suelo y vegetación, por lo que si se retoma para estudios futuros debemos considerar ampliar la temporalidad de análisis, emplear imágenes satelitales con mayor resolución e incluir características físicas, políticas, sociales y culturales ya que los cambios en la vegetación no son homogéneos en el espacio ni en el tiempo.

Referencias

- Abdelaziz, S. (2019). Técnicas de detección de cambios mediante teledetección para el desarrollo sostenible y la desertificación. Tesis de doctorado. Universitat Politècnica de València. Valencia.
- Aguilar A.H., Mora Z.R y Vargas B.C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, SPOT-2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. Revista geográfica de América Central. 53. 39-59.
- Álvarez, P y Muñoz, C. (2008). Instrumentos territoriales y económicos que favorecen la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad. Capital natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad. CONABIO (pp. 229-258). México. Recuperado el 19 de febrero de 2020, de https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20III/III05_Instrumentos%20teritoriales%20y%20economicos%20que%20favorece.pdf.
- Ángeles, M. I. (2019). Detección de cambios de la cobertura de manglar en la Barra de Tecoanapa Guerrero aplicando técnicas de percepción remota. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arnout, S. (2006). A review of land-use change models. UNEP World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC). Recuperado el 4 de marzo de 2020 de https://www.unep-wcmc.org/system/comfy/cms/files/files/000/000/802/original/Land_Use_Change_Models_2016_WEB.pdf
- Asokan, A & J, Anitha. (2019). Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. Earth Science Informatics. (12). 143-160.
- Avila, V.S y Perevochtchikova, M. (2019). Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 21 de julio de 2020 de http://www.iiec.unam.mx/publicaciones/libros_electronicos/sistemas-socio-ecol%C3%B3gicos-marcos-anal%C3%ADticos-y-estudios-de-caso-en.
- Barrera, A. (1962). La Península de Yucatán como provincia biótica. Escuela nacional de ciencias biológicas.
- Bautista, F y Estrada, H. (1998). Conservación y manejo de los suelos. Revista CIENCIAS. (50). 50-55. Recuperado el 3 de marzo de 2020 de <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/109-revistas/revista-ciencias-50/915-conservacion-y-manejo-de-los-suelos.html>.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T y Aguilar, Y. (2010). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. El relieve en Capítulo 1: contexto físico. 7-9. Recuperado el 231 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo>.

- Bautista, F y Palacio, G. (2012). Península de Yucatán. Recuperado el 21 de julio de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/255685775_Peninsula_de_Yucatan-humano-en-yucatan.
- Berlanga, C.A., García, R.R., López, J y Ruiz, A. (2010). Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). Investigaciones geográficas, (72), 7-22. Recuperado el 12 de marzo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000200002&lng=es&tlng=es.
- Cacho, A. (2016). Evolución e impacto de la política agrícola en el campo mexicano: 1982-2010. Una visión desde la producción tradicional. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Camacho, J.M, Juan, J.I., Pineda, N.B., Cadena, E.G., Bravo, L.C y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. Madera y bosques. 21(1), 93-112. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México.
- Camacho, R., Camacho, J.M., Balderas, M.A y Sánchez, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. Madera y bosques, 23(3), 39-60. Recuperado el 23 de enero de 2020 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712017000300039.
- Carballo, R. (2016). Identificación del flujo subterráneo como consecuencia de la incidencia de plaguicidas y de cargas hidráulicas en una zona de campo de golf de la Riviera Maya. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Carton, P. M. (2012). Dimensión geográfica de las políticas públicas ambientales para la conservación de la biodiversidad en México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castillo, L y Velázquez, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio-ecológicos y resiliencia. Revista Quivera. 11-32.
- Castro, R. B. (2016). Análisis de las políticas públicas ambientales relacionadas con el uso sustentable del suelo de conservación del Distrito Federal en el periodo 2000-2012. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cattaneo C.A., Larcher L.I., Ruggeri A.I., Herrera A.C y BIASONI E.M. (2011). Métodos de umbralización de imágenes digitales basados en entropía de Shannon y otros. Revista Mecánica Computacional, (30). Pp 2785-2805.
- Censo de Población y Vivienda, (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>.
- Challenger, A., Bocco, G., Equihua, E., Lazos, E y Maass, M. (2014). La aplicación del concepto del sistema socio-ecológico: alcances, posibilidades y limitaciones en la gestión ambiental de México. Investigación ambiental. 6(2). Recuperado el 21 de julio de 2020 de

https://www.academia.edu/11856224/La_aplicaci%C3%B3n_del_concepto_del_sistema_socio-ecol%C3%B3gico_alcances_posibilidades_y_limitaciones_en_la_gesti%C3%B3n_ambiental_de_M%C3%A9xico. Applying the concept of the Socio-ecological system scope possibilities and limitations in the environmental management of Mexico.

- Chuvieco, E. (2015). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. España. Ariel Ciencia.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. (2013). Inventario Estatal Forestal y de Suelos. México. Recuperado el 23 de abril de 2020 de <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-yucatan/inventario-estatal-forestal.php>.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2020. Estimación de la tasa de deforestación en México para el periodo 2001-2018 mediante el Metodo de muestreo. Recuperado el 22 de junio de 2023 de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7768Documento%20tecnico%202020%20Deforestacion%20Bruta%20Final.pdf>.
- Cortes O.J.A., Muriel A y Mendoza V.J.A. (2011). Comparación cualitativa y cuantitativa de las técnicas básicas de umbralización global basadas en histogramas para el procesamiento digital de imágenes. Scientia Et Technica, 16(49). Pp 266-272. Colombia.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2019). ACUERDO por el que se emiten los Lineamientos de Operación del Programa Sembrando Vida. Recuperado el 24 de enero de 2020, de http://dof.gob.mx/busqueda_detalle.php.
- Di Gregorio, A. (2016). Land Cover Classification System. Classification concepts. Software version 3. FAO. Recuperado el 4 de marzo de 2020 de <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>.
- Domínguez, V.A y López, M.A. (2017). Teoría General de Sistemas, un enfoque práctico. Revista Tecnociencia. 10(3). 125-132. Recuperado el 31 de marzo de 2020 de http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v10n3/Data/Teoria_General_de_Sistemas_un_enfoque_practico.pdf.
- Durán, R y García, G. (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Distribución espacial de la vegetación en Capítulo 3: ecosistemas y comunidades. 131-135. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>.
- Eastmond, A y García, A. (2011). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Impacto de los sistemas agropecuarios sobre la biodiversidad en Capítulo 2: contexto social y económico. 98-104. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>.
- Ellis E. (2007). Land-use and land-cover change. Recuperado el 4 de marzo de 2020 de http://www.aughty.org/pdf/landuse_landcover.pdf.

- Escalante, R.I. (2006). Desarrollo rural, regional y medio ambiente. *ECONOMÍAUNAM*. 3(8). 70-94. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <http://www.scielo.org.mx/pdf/eunam/v3n8/v3n8a5.pdf>.
- Espinasa, R. (2007). Karst. Nuevo Atlas Nacional de México. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/154>.
- Estrada, H., Jiménez, J.J., Álvarez y Barrientos, R.C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Revista Acta Universitaria*. Vol 29. 1-18.
- FAO y PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. Recuperado el 03 de noviembre de 2021 de <https://www.fao.org/3/ca8642es/CA8642ES.pdf>.
- Fernández, E. (2013). Integración de la política ambiental en México. El caso de la política agropecuaria. *Revista Gestión y Política Pública*. 23(2). 465-505. Recuperado el 21 de julio de 2020 de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792014000200006.
- Flores, J.S., Durán, R y Ortiz, J.J. (2011). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Comunidades vegetales terrestres en Capítulo 3: ecosistemas y comunidades. 125-129. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>.
- Fontaine, G., Narváez, I y Cisneros P. (2008). Geo Ecuador 2008: Informe sobre el estado del medio ambiente. Recuperado el 24 de marzo de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/258048731_Geo_Ecuador_2008_Informe_sobre_el_estado_del_medio_ambiente/link/00b49526c78f3822a5000000/download.
- Galicia, L., García, A., Gómez, L y Ramírez, M.I. (2007). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Revista Mexicana de las Ciencias*. 58(4). 51-60. Recuperado el 24 de marzo de 2020 de <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/223-vol-58-num-4-octubre-diciembre-2007>.
- García, T.J y Mas, J.F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones geográficas*, 67, 7-19. Recuperado el 23 de enero de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000300002&lng=es&tlng=es.
- García, G y Graniel, E. (2011). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. *Geología en Capítulo 1: contexto físico*. 4-6. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>.
- García H., S. (2018). Umbralización adaptativa de imágenes basada en histogramas espacio-color. Universidad de La Laguna.

- Gil P., Torres F., Ortiz F.G. (2004). Detección de objetos por segmentación multinivel combinada de espacios de color. Recuperado el 22 de septiembre de 2021 de <http://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXV/documentos/19-abtsuflva.pdf>.
- Gil, J & Vivar, J. (2015). La modernización agrícola en México y sus repercusiones en espacios rurales. Revista Antropologías del Sur. (3). 51-67. Recuperado el 20 de julio de 2020 de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6756899.pdf>.
- Giri, T. (2007). Manual on deforestation, degradation and fragmentation using remote sensing and GIS. Forestry department FAO. Recuperado el 17 de marzo de 2020 de <http://www.fao.org/forestry/18222-045c26b711a976bb9d0d17386ee8f0e37.pdf>.
- González, E. (2016). Análisis del cambio de usos del suelo agrícola y forestal del Distrito Federal 2005-2013, utilizando SIG y PR. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Graniel, E. (2011). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. Hidrología en Capítulo 1: contexto físico. 12-13. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>.
- Hernández, H.E. (2019). Dinámica de cambio de uso de suelo y coberturas vegetales en el derrame de lava del volcán Xitle, 1993-2015. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Indicadores económicos del estado de Yucatán. (2020). Universidad autónoma de Yucatán. Recuperado el 21 de julio de 2020 de <http://www.contaduria.uady.mx/files/indicadores-economicos.pdf>.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Superficie, Recuperado el 23 de abril de 2020 de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/>.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Yucatán 2017. Recuperado el 23 de abril de 2020 de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/YUC_ANUARIO_PDF.pdf.
- Johansen, O. (1993). Introducción a la Teoría General de Sistemas. México. LIMUSA.
- Kauffer E.F y Villanueva, C.L. (2011). Retos de la gestión de una cuenca construida: la península de Yucatán en México. Revista aqua-LAC. 3(2). 81-91. Recuperado el 21 de julio de 2020 de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/AquaLAC-Vol3_Numero2-5-15.pdf.
- Khorram, S., Koch, F., F van der Wiele, C y Nelson, S. (2012). Remote Sensing. Springer.
- Lee, S. (2018). What is land use and land use change? (Foodsource: building blocks). Food Climate Research Network. University of Oxford. Recuperado el 14 de marzo de 2020 de <https://www.foodsource.org.uk/building-blocks/what-land-use-and-land-use-change#part4>.
- Leija, E.G., Reyes, H., Reyes, O., Flores, J.L y Sahagún, F.J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca,

- México. Madera y bosques, 22(1), 125-140. Recuperado el 23 de enero de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100125&lng=es&tlng=es.
- Lili, X., Baolin, L., Yecheng, Y., Xizhang, G., Tao, Z y Qingling, S. (2016). Detecting different types of directional land cover change using MODIS NDVI time series dataset. Remote Sensing. (8). Recuperado el 14 de marzo de 2020 de <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/495>.
 - Lillesand T. M., Kiefer R. W y Chipman J. W. (2015). Remote sensing and image interpretation. WILEY. Recuperado el 24 de junio de 2023 de <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-remote-sensing-and-image-interpretation.pdf>.
 - Llamas, I. (2018). Sistemas socio-ecológicos ¿sistemas qué? Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. Recuperado el 2 de abril de 2020 de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2018/2018-03-22_ILlamas-Sistemas_socio_ecologicos.PDF.
 - López, V.H., Balderas, M.A., Chávez, M.C., Juan, J.I y Gutiérrez, J.G. (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. CIENCIA ergo-sum, 22(2), 136-144. Recuperado el 23 de enero de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5116566>.
 - Lugo J., Aceves, J.F y Espinasa, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Instituto de Geografía, UNAM. Revista. 10(2). 143-150.
 - Macedo C., A. (2012). Técnicas de clasificación automáticas de uso de suelos agrícolas y forestales basadas en imágenes digitales. Tesis de doctora. Universidad Complutense de Madrid.
 - Marco Geoestadístico (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado el 21 de julio de 2020 de <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>.
 - Martín, B y Montes, C. (2011). Biodiversidad en España. Base de la sostenibilidad ante el cambio global. Capítulo 6 Biodiversidad y servicios de los ecosistemas. Observatorio de la sostenibilidad en España.
 - Mishra S., Shrivastava, P y Dhurvey, P. (2017). Change detection techniques in remote sensing: a review. International Journal of Wireless and Mobile Communication for Industrial Systems. 4(1). 1-8.
 - Muasel P., Brondízio, E & Moran, E. (2004). Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing. 25(12). 2365-2401.
 - National Research Council. (2014). Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements. Washington, D.C. The National Academies Press.
 - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2018). What is remote sensing? Recuperado el 17 de marzo de 2020 de <https://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html>.

- Orozco, A.A. (2019). Modelización prospectiva del cambio de uso de suelo en la Región Transfronteriza México-Guatemala para los años 2010-2030. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pineda, O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A.C. CentroGeo.
- Riomoros C.M.I. (2016). Segmentación automática de texturas en imágenes agrícolas. Tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid.
- Ryan Coffey. (2013). The difference between “land use” and “land cover”. Michigan State University. Recuperado el 3 de marzo de 2020 de https://www.canr.msu.edu/news/the_difference_between_land_use_and_land_cover.
- Saucedo, J.I. (2014). Poder político y jurídico en Yucatán en el siglo XVI. Instituto de investigaciones jurídicas, Universidad Autónoma de México.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Informe de la situación del medio ambiente en México. Recuperado el 12 de marzo de 2020 de http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/index.htm.
- SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. México.
- Suarez y Rivera. (1998). Hidrología y Fauna acuática de los cenotes de la Península de Yucatán. Consultado el 28 de mayo de 2020 recuperado de <http://repositorio.fcencias.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11154/143136/48VHidrologiaFauna.pdf?sequence=1>.
- U. S. Geological Survey (USGS). What is remote sensing and what is it used for? Recuperado el 17 de marzo de 2020 de https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.
- Valarezo J. C. (2016). Introducción a la plataforma Global Forest Watch y su mapa interactivo para el monitoreo de áreas protegidas municipales y su aplicación como recurso investigativo y didáctico en la enseñanza de las ciencias ambientales. FORAGUA. Recuperado el 03 de noviembre de 2021 de <http://www.foragua.org/wp-content/uploads/2017/07/MANUAL-GFW-FORAGUA-web.pdf>.
- Zhe, Z. (2017). Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing. (130). 370-384.