



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):
Análisis y Mapeo de la deforestación en el municipio de
Bacalar, Quintana Roo

TESIS

Para obtener el grado de
INGENIERA AMBIENTAL

PRESENTA

María Inés Cima Ruiz

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María Luisa Hernández Aguilar

ASESORES

Mtra. Mónica Ariadna Chargoy Rosas

Mtro. Gerardo Daniel López Montejo

Mtro. Juan Carlos Ávila Reveles

Dr. Víctor Hugo Soberanis Cruz



Chetumal, Quintana Roo, México, septiembre de 2021



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Tesis
del programa de licenciatura y aprobada como requisito

para obtener el grado de:

INGENIERA AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

Directora:

Dra. María Luisa Hernández Aguilar

Asesor:

M.P. Gerardo Daniel López Montejo

Asesor:

M.P. Mónica Ariadna Chargoy Rosas

Asesor:

Dr. Víctor Hugo Soberanis Cruz

Asesor:

M.C. Juan Carlos Ávila Reveles



Chetumal, Quintana Roo, México, septiembre de 2021

Contenido

Introducción	2
Antecedentes.....	3
Justificación	7
Planteamiento del problema	8
Objetivo General	10
Objetivos Específicos.....	10
Hipótesis.....	10
Municipio de Bacalar	11
Capítulo 1. Marco teórico.	22
1.1. Área de estudio.	23
1.2. Deforestación y cambios de uso de suelo.....	25
1.3. Aplicación de tecnologías geoespaciales a los estudios ambientales.....	27
Capítulo 2. Metodología para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	35
2.1. Estimación del NDVI.....	36
Capítulo 3. Determinación de la deforestación a través del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el municipio de Bacalar.	40
3.1. Cálculo del NDVI por ejido para los años 2000, 2004, 2008, 2013, 2017 y 2020.	41
3.2. Análisis Cartográfico.....	58
Capítulo 4. Discusión y conclusiones.	69
4.1. Discusión	70
4.2. Conclusiones	73
Bibliografía	76
Anexo Fotográfico del Ejido Salamanca.....	81

Introducción

A lo largo de los años, el municipio de Bacalar ha ido sufriendo muchos cambios, entre los que destaca la deforestación por la práctica de la agricultura intensiva. Estas prácticas no son del todo controladas ni monitoreadas por lo que no es posible determinar la magnitud del daño que está teniendo sobre nuestro ambiente, esto puede estar relacionado a la falta de información que se tiene sobre la importancia de la diversidad de especies como la flora y la fauna que abunda en México, nuestros suelos y cuerpos de agua cercanos. Por ello, se ha decidido abordar el tema de la deforestación en el municipio de Bacalar, mediante un Índice de Vegetación utilizado en otros países para tener conocimiento de cómo está desarrollándose la agricultura practicada en sus tierras, así como la salud, calidad y cantidad de la vegetación en las tierras destinadas.

En la actualidad se cuenta con diversos instrumentos para poder obtener los datos requeridos para este tipo de investigación, a través de las diferentes herramientas geomáticas como los son en este caso, la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG). Partiendo de la hipótesis se afirma que desde el año 2000 al 2020, se han ido presentando transformaciones en algunos ejidos de Bacalar, algunos más significativos que otros, en los mapas presentados se demuestra cómo estos cambios han ido aumentando y algunos otros decreciendo.

Antecedentes

De acuerdo con el informe de la situación ambiental del medio ambiente en México del año 2005, en el territorio Nacional Mexicano se distribuye una amplia diversidad de vegetación natural tales como los bosques, selvas, matorrales y pastizales pertenecen a ella, ante la superficie del país existe presencia de los asentamientos humanos a través de la urbanización y sus terrenos dedicados a las diferentes actividades (agrícolas, ganaderas, acuícolas, entre otras) (SEMARNAT, 2005).

Según Reid et al. (2004) en los últimos años, los seres humanos han desatado la transformación de los ecosistemas del mundo con un aumento rápido y extenso en comparación a otros años. Los sistemas de cultivo y ganaderos han ido formando la cuarta parte de la superficie terrestre, para la obtención de alimentos, combustibles y otros (SEMARNAT, 2005).

El empleo de la teledetección en el seguimiento de los procesos de deforestación, es una herramienta muy valiosa en estudios ambientales, que nos permiten evaluar fácilmente el estado de áreas ecológicamente amenazadas; el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una manera rápida y precisa para los análisis de la vegetación en una imagen, en la cual pueden definirse la salud de las planta a través de una escala que va de -1 a 1, así como el tipo de vegetación que existe en un determinado lugar por medio de su firma reflectiva, entre otras.

El NDVI ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados en la teledetección desde su introducción en la década de 1970. En la actualidad se ha utilizado este índice en la agricultura de precisión, ya que, por sus amplias ventajas de los datos satelitales, se pueden obtener precisión en los resultados y una alta frecuencia de adquisición (Toribio, 2019).

Algunos de los beneficios que tiene el índice de vegetación es su uso para determinar el tamaño de un área, ya sea desde un terreno pequeño hasta uno muy grande, con suelo desnudo, estructuras construidas por el hombre, entre muchas más (EOS, 2020).

El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cubierta terrestre (artificial), determinar su estado general, nos ayuda a definir y visualizar las áreas de vegetación al momento de hacer el mapeo, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento de la misma (EOS, 2020). En la agricultura, el NDVI nos brinda varias aplicaciones como los son, medir la biomasa y evaluar el estado y la salud de los cultivos, identificar plagas, enfermedades, hongos o zonas excesivamente secas en el campo para prevenir daños, observar la dinámica de la vegetación a lo largo de la temporada de crecimiento, establecer las condiciones normales de crecimiento para los cultivos de un área específica con las series temporales, estimación del rendimiento de cultivos, detectar las áreas de riesgo dentro del campo más rápidamente y ajustar el gasto de agua, nutrientes para los cultivos y los plaguicidas de forma eficaz, controlar las condiciones de los pastos y su productividad y monitorizar sequías y ayudar a pronosticar zonas con peligro de incendio (EOS, 2020).

Este cálculo se aprovecha de que la vegetación es muy absorbente en la banda roja y muy reflectante en el infrarrojo cercano (NIR). Por lo tanto, las superficies con grandes cantidades de vegetación se pueden encontrar mediante la comparación de las bandas espectrales “rojas y NIR”, el cual se calcula con una ecuación.

Los cambios de uso de suelo provocan la degradación y transformación de los ecosistemas. De acuerdo con un estudio realizado en el 2005 respecto a la dinámica del uso del suelo en 3 ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, se encontró en imágenes satelitales de los años 1990 y 2000 obtenidas a través del satélite Landsat ETM, una gran disminución en la vegetación secundaria y de recuperación de selva con una tasa del 0.6% anual, detectando también el uso de la vegetación secundaria y de selva para actividades agropecuarias (García G., 2005).

En la Región sur de la Península de Yucatán (Xpujil, Dos Lagunas, Nadz Ka'an y Nuevo Becal), a través del índice de vegetación “NDVI” con ayuda de las imágenes del satélite Landsat ETM, se calcularon las parcelas de la Selva Baja Inundable (SBI), este estudio se realizó con el afán de determinar la riqueza de especies, así como los valores de diversidad Shannon-Wiener, en el que se trabajaron 4

secciones del área de estudio (Selva Baja Inundable y Selva Circundante) tomando el centro, intermedio, borde y selva, el bajo se clasificó dentro de un ambiente subhúmedo presentando una mayor riqueza de especies y la parcela de borde del ambiente seco presentó el menor número de especies. Con respecto al análisis temporal en el ambiente húmedo la menor diferencia entre el valor mínimo y máximo del NDVI de la SBI se presentó en la época de secas. La mayor diferencia se presentó en lluvias, y el vigor de la vegetación es alto en lluvias y en nortes (Tun F., Vester, Durán García, y Schmook, 2008).

La deforestación es un factor crítico, siendo parte de los signos más evidentes del cambio climático global, los impactos que tiene este cambio climático se han podido monitorear a través de las herramientas computacionales orientadas al estudio de los recursos naturales, una de ellas es la captación de imágenes satelitales, desarrollo de softwares para el procesamiento de dichas imágenes en el estudio de la cobertura vegetal (Aragón, et al., 2013).

Aragón et al. 2013, realizaron un monitoreo de diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí, México, en el que el objetivo era poder analizar el proceso de deforestación mediante el uso de las herramientas geomáticas, estratificando el área de estudio en 1) Altiplano, 2) Centro, 3) Media y 4) Huasteca, utilizando la intersección de mapas temáticos de la Serie II (1993) y IV (2007) de vegetación y uso del suelo, generados por el INEGI. Para analizar los cambios ocurridos los años 2000 y 2010, se realizaron matrices de cambio, se rasterizaron los tipos de vegetación y uso del suelo de cada fecha de análisis, con un pixel de 50 m x 50 m como unidad de análisis (Aragón, et al., 2013).

En el análisis realizado para la detección del cambio de uso de suelo en San Luis Potosí, se encontró que 88.3% del territorio permaneció sin cambio, mientras que 11.7% de la superficie presentó algún tipo de cambio. Con base al cálculo del NDVI, la deforestación ocurrida durante el periodo 1993-2007 fue de 77,017.3 hectáreas (1.9%), que implica la pérdida del bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto, selva perennifolia y subperennifolia, selva caducifolia y subcaducifolia, matorral y mezquital (Aragón, et al., 2013).

Un estudio destinado para la evaluación y mapeo de los determinantes de la deforestación en la Península de Yucatán, menciona que las causas inmediatas de la deforestación en el municipio de Bacalar, han sido por la agricultura mecanizada, con una amenaza de nivel alto, la agricultura temporal con amenaza de nivel alto, ganadero con maíz de nivel alto de amenaza y maicera de amenaza nivel alto, la metodología utilizada para la elaboración del mapa de estos determinantes de la deforestación fue a través de una clasificación de Uso Actual y Determinantes en la que se desarrollaron mapas detallados de las zonas afectadas por la deforestación entre el año 2000 y 2013, utilizando imágenes satelitales del satélite Landsat 8 con un tamaño de pixel de 30x30 m., se ocuparon diversas fuentes bibliográficas y herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) para así determinar espacialmente el uso de suelo actual y las causas directas y subyacentes asociadas a cada pixel, de igual forma para obtener estos resultados se realizó la integración de datos georreferenciados y herramientas geomáticas: Google earth, CONAFOR 2010 (puntos de incendio registrados al año 2007), Producto derivado del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, CONAFOR 2014 (Cartografía de polígonos de incendio forestales entre 2005-2013) (Ellis, Romero, y Hernández, 2015).

Para el año 1902, Othón P. Blanco fue comisionado por el Gobierno de México para asegurar la frontera, de manera pacífica, logrando acercarse a los mayas y haciéndoles reconocer el gobierno de la república. Bacalar ha ido creciendo tanto en población como económicamente, es incluso centro de desarrollo para muchas otras comunidades situadas en sus alrededores y cercanías. La actual Bacalar fue elevada al rango de ciudad el 26 de junio de 2007 por la aprobación plena del Cabildo de Othón P. Blanco, y desde ese momento se consideró este acto como el preámbulo hacia una autonomía plena como San Felipe de Bacalar. La ciudad de Bacalar fue nombrada “Pueblo Mágico” oficialmente el 27 de febrero de 2007, consiguiendo con esto apoyos por parte de la secretaria de Turismo Federal para la promoción internacional de la ciudad como un enclave centrado en el turismo ecológico y de conservaciones de las tradiciones locales. El 2 de febrero del año 2011, Bacalar es nombrado como un municipio más del Estado de Quintana Roo (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2020).

Justificación

La pérdida de la cubierta vegetal por medio de la deforestación impacta en el cambio de uso de suelo, uno de los principales factores en la variación climática global, insistiendo en la alteración de los ciclos biogeoquímicos. De igual forma es una de las causas más importantes de pérdida de biodiversidad (SEMARNAT, 2005).

La remoción indiscriminada de los árboles da como resultado la pérdida de la estabilidad del suelo, provocando la erosión de este, ya que, al remover los árboles, no se podrán proporcionar los nutrientes necesarios que brindan las plantas y los árboles al suelo (Álvarez S. , 2017).

De la misma manera en la que se afecta el suelo por la falta de nutrientes, este, llega a tener otro factor para que se desarrolle la erosión, cuando las lluvias caen directamente a la tierra, el agua golpea y debilita el suelo, produciendo de esta forma un reposo de agua (Álvarez S. , 2017) lo que a corto o largo plazo se vuelve un factor de inundaciones, alterando así el balance de los suelos con respecto a la permeabilidad que tienen como propiedad física.

De acuerdo con Carlos Caña, los beneficios que tienen los bosques sobre los ecosistemas acuáticos son variados, ya que la cubierta vegetal tiene como una de sus importantes funciones el proteger el suelo de la erosión, dando sombra y controlando la temperatura de los cuerpos de agua, mantener la humedad y el ciclo hidrológico (Álvarez, et al., 2018) recordando aquí que el municipio de Bacalar cuenta con algunos cuerpos de agua de mucha importancia.

Para un análisis más acertado de esta problemática se pretende realizar un análisis y mapeo de un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en algunos ejidos que se encuentran en el municipio de Bacalar, Quintana Roo.

Los resultados que se obtengan del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para calcular el área de deforestación de la cubierta vegetal en el municipio de Bacalar, determinará el grado de afectación en la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (Alonso, 2017), ya que, desde antes de la deforestación, el ecosistema se mantenía en equilibrio.

Planteamiento del problema

México es un país rico en flora, contando con 138 millones de hectáreas de vegetación forestal, del 70% de esta, 64.9 millones de hectáreas corresponden a bosques y selvas, en donde habitan y se desarrollan aproximadamente 11 millones de personas, las cuales por necesidad hacen uso de estos recursos naturales (Zamora, 2016). Por otra parte, México también es considerado un país con una diversidad muy grande en fauna, se estima que existen más de 200,000 especies diferentes, lo cual significaría un 10% de la biodiversidad mundial (Bologna, 2016).

Durante los años 2005-2010 la deforestación fue de 155,000 hectáreas por año, el impacto de este fenómeno ha ido afectando en mayoría a las zonas con mayor bosque tropical, por ejemplo, en los estados de Chiapas, Yucatán y Campeche, localizados al sur del país; estas regiones están sujetas a fenómenos meteorológicos extremos, de igual forma es reiterada la presencia de incendios, plagas y diferentes enfermedades que a su vez afectan en forma de pérdida a la cobertura vegetal (Zamora, 2016).

En el municipio de Bacalar localizado al sur de México en el estado de Quintana Roo, el desmonte agropecuario, es uno de los principales factores que han causado la deforestación durante los últimos años.

Entre las culturas asentadas en el municipio de Bacalar está la menonita, quienes destacan por vivir de una economía primaria, agricultura intensiva y actividades forestales. Desde un punto de vista económico, la producción agrícola se convirtió en su principal actividad económica, ya que, de acuerdo con sus costumbres, lo anterior logra mantener a la familia unida, ocupada en el trabajo y, contemplando sus parámetros morales “alejada de tentaciones o malos pensamientos” (García y Vargas, 2018).

Grupos de menonitas provenientes de diversas partes del mundo y/o del país, en especial los provenientes de Blue Creek, Belice, han ido estableciéndose en diferentes partes del municipio de Bacalar (Hernández S. , 2014). Estos son reconocidos por destacar en la agricultura que dentro de su extensión territorial

productiva operan familias, sembrando granos de soya, sorgo y chigua (calabaza local) y, en menor medida, frijol, maíz y cacahuate, algunas hortalizas como cilantro, chile habanero, sandía y tomate (García y Vargas, 2018).

Asimismo, han practicado libremente sus propios métodos de agricultura que, a pesar de sus creencias religiosas, no se les permite hacer uso de la tecnología, pero sí de maquinaria poco convencional para apoyarse, su dedicación a la agricultura y ganadería, no les hace ver los efectos que conlleva las prácticas de deforestación a la cobertura forestal (Hernández S. , 2014). Este fenómeno, ha ido desatándose aproximadamente desde el año 2002 hasta hoy en día, a tal punto que la tala excesiva de árboles ha llegado a más de 10 mil hectáreas desplazadas por el municipio. Por tal motivo, se eligieron los ejidos donde destaca su presencia, ya que a este grupo se le atribuye la pérdida de alrededor de 1,445 hectáreas de bosque tropical en 3 predios de menonitas en los ejidos El Bajío, El Paraíso y San Fernando, en el municipio de Bacalar, de manera ilegal y sin ningún tipo de autorización. Cabe mencionar que menonitas han adquirido derechos ejidales (Quadri, 2017).

Dentro de la lista de los lugares involucrados, se encuentran los siguientes ejidos: San Fernando, La Buena Fe, Salamanca, El Bajío, Paraíso, Payo Obispo, Nuevo Tabasco y Manuel Ávila Camacho; como consecuencia a esta problemática, se han ido desarrollando varias controversias con los pobladores, autoridades federales y estatales, que hasta hoy en día no han llegado a una solución de este inconveniente y como bien se sabe, se ha convertido en un problema más que contribuye al cambio climático.

La deforestación, puede causar diversos problemas en el medio ambiente, en los cuales destacan: la erosión del suelo y la desestabilización de las capas freáticas, lo que provoca inundaciones y sequías, reducción o pérdida de la biodiversidad de las diferentes especies de plantas y animales, es un factor coadyuvante del cambio climático, alteración a los ciclos biogeoquímicos, islas de calor, emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, entre otros (National Geographic, 2010).

Objetivo General

Analizar el proceso de deforestación mediante el uso de herramientas geomáticas en diferentes ejidos del municipio de Bacalar, Q. Roo.

Objetivos Específicos

1. Describir las transformaciones territoriales y de uso de suelo en los ejidos seleccionados en el municipio de Bacalar.
2. Estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con imágenes satelitales.
3. Determinar el estado general de la vegetación y la cobertura del suelo en 6 periodos diferentes de años a partir del año 2000 hasta el año 2020.
4. Detallar qué efectos tiene la deforestación en estos lugares y los daños ocasionados al ambiente.

Hipótesis

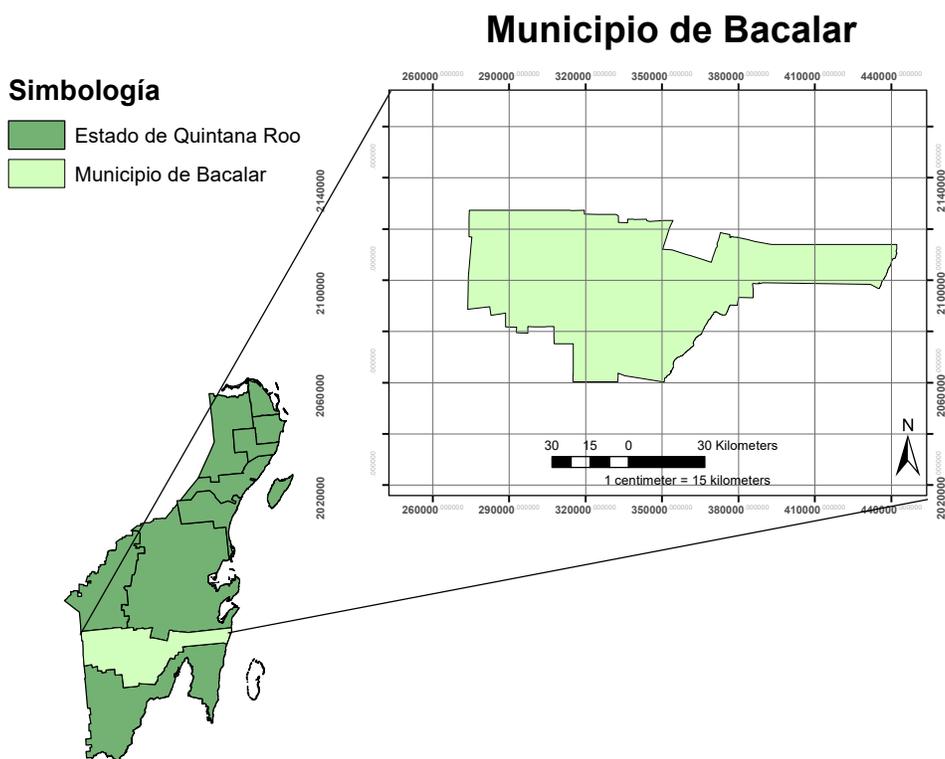
- A partir del año 2000 hasta hoy en día, se han ido presentando diversos cambios en el uso de suelo en el municipio de Bacalar, ocasionando la deforestación y pérdida de vegetación principalmente donde existe la práctica de la agricultura intensiva.

Municipio de Bacalar

El Municipio de Bacalar se encuentra al Sur del Estado de Quintana Roo, tiene colindancias al Noroeste con el municipio de José María Morelos; compartiendo un aproximado de 45.164 km de frontera; al Noreste con el municipio de Felipe Carrillo Puerto, cerca de 154.448 km de frontera; al Este con el Litoral del Mar Caribe, alrededor de 20.100 km de costa marítima; al Sur con el Municipio de Othón Pompeyo Blanco, compartiendo un aproximado de 39.549 km de frontera; y al Oeste con el estado de Campeche, alrededor de 39.549 km de frontera (INEGI, 2016).

La superficie del municipio de Bacalar es de 7,161.500 kilómetros cuadrados, con coordenadas geográficas 18°40'34" Latitud Norte y 88°23'21" Longitud Oeste, con una Altitud de 11 metros sobre el nivel del mar (msnm) (INEGI, 2016).

Este municipio fue creado a partir del municipio de Othón Pompeyo Blanco, y fue decretado como zona municipal de Bacalar en el año 2011.



Mapa 1 Municipio de Bacalar, localización. Fuente: Elaboración propia

Relieve

Así como el Estado de Quintana Roo, el municipio de Bacalar tiene un relieve casi plano, irrumpido por pequeños cerros o colinas de tres a cuatro metros y numerosas hondonadas con un declive suave en ascenso de Sureste a Noroeste (Gómez J. , 1998). El Estado de Quintana Roo, carece de montañas, volcanes o cerros de gran tamaño, que puedan distinguirse a larga distancia.

El relieve influye mucho en la distribución del agua recibida por medio de las precipitaciones, lo que afecta directamente el proceso de la erosión hídrica, una de las reglas más destacadas en general sobre el relieve, es que las superficies elevadas con relieves inclinados o convexos pierden más agua por escorrentía, arrastrando sedimentos, por lo que los suelos son más someros, por otra parte las superficies más bajas que son cóncavas o depresivos reciben agua extra y sedimentos, por lo que el desarrollo de los suelos es más profundo (INTAGRI, 2017).

El Este del Municipio de Bacalar colinda con el litoral del caribe, ese punto se encuentra de 0 a 1 metro sobre el nivel del mar. Conforme se avanza de Este a Oeste en el municipio, su relieve va en ascenso, a la mitad del Municipio, en donde se encuentran los ejidos de Divorciados y Manuel Ávila Camacho, la altitud se presenta aproximadamente a 30 metros sobre el nivel del mar. Y al llegar a los límites de colindancia con el estado vecino, que es Campeche, se encuentra el ejido de Miguel Alemán, en donde el relieve asciende aproximadamente a 90 metros sobre el nivel del mar. Y el ejido con más altitud dentro del territorio del municipio de Bacalar, se encuentra Otilio Montañón, que tiene aproximadamente 103 msnm (Herrera, 2017).

Suelos

Los suelos dominantes en la parte sur del estado, donde se localizan los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar, son suelos del tipo Leptosol, Vertisol, Phaeozem, Gleysol, Regosol, Luvisol, Solonchak y Arenosol (INEGI, 2009).

Como cita Morales (1994), los suelos del municipio de Bacalar son variados, y se describen como un suelo mixto, de color café rojizo con contenido de humus e inclusión de piedra caliza, ideal para sembrar (Herrera, 2017). Bacalar contiene algunas de las áreas naturales protegidas federales, como son Uaymil, Bala'an Ka'ax y Sian Ka'an.

Ecosistemas

Un ecosistema es una comunidad de seres vivos que interactúan entre sí y con el medio físico (Bedoya, 1985). En el municipio de Bacalar se encuentran 5 ecosistemas, pertenecientes al estado de Quintana Roo los cuales son: El arrecife, el manglar, la sabana, la selva y la laguna, cada uno de estos ecosistemas comparten entre sí, su flora y fauna (Herrera, 2017).

De acuerdo con Herrera (2017), el arrecife coralino es uno de los ecosistemas que se encuentra en los litorales del municipio de Bacalar (aproximadamente unos 21 kilómetros de litoral del mar Caribe), el cual es una parte costera del estado de Quintana Roo. Este arrecife es conocido como "El gran cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental" y se prolonga desde toda la costa de Quintana Roo, hasta recorrer los litorales de los países de Belice y de Honduras.

Por otra parte, el manglar también es parte de uno de los 5 ecosistemas que forman parte del municipio, este se encuentra en las cercanías de la Bahía de la Ascensión y en las orillas de la Laguna de Bacalar o Laguna de los 7 colores (Herrera, 2017).

Al Este del municipio y al Suroeste de la Bahía de la Ascensión, se puede apreciar el ecosistema de la sabana, en el tramo de Mahahual y por la carretera Cafetal-Mahahual. Gómez N. (1998) menciona que la sabana de Quintana Roo, es una zona pantanosa plana con vegetación de gramíneas, manchones de arbustos espinosos y palo de tinte. Entre otras plantas también pueden encontrarse acacias, chechemales, mangles, palmas de corozo, hicacos y cocoteros. La fauna es compuesta por reptiles (boas, lagartos, iguanas y tortugas), ratones, zorros, tapires, zopilotes, garzas, picos de espátula, pelícanos, y demás.

El ecosistema predominante del municipio se encuentra al Oeste hasta alcanzar el municipio de Calakmul, Campeche a nivel peninsular, la región de Calakmul ha sido descrita como selva alta subperennifolia incluyendo variantes que van desde selva alta perennifolia hasta selva mediana subperennifolia, por otra parte, también se han añadido para esta región la selva baja subperennifolia, la sabana y la vegetación de hidrófitos (Martínez y Galindo, 2002). Dentro de la fauna se pueden encontrar mamíferos como ardillas, armadillos, jabalíes de labios blancos, tlacuaches, tigrillos, pumas; con una gran variedad de aves como los son las chachalacas, tucanes, loros, tecolotes, zopilotes, pájaros carpinteros, faisanes, pavos de monte y colibríes; también murciélagos, reptiles, iguánidos y gran variedad de insectos, entre otros (Herrera, 2017).

La laguna es el ecosistema acuático de mayor importancia para el municipio de Bacalar, hablando ecológica y económicamente. Se encuentra al lado Este de la cabecera municipal y al lado Norte de la Ciudad de Chetumal. Forma parte de un complejo lagunar en dirección al mar. La flora de la laguna es caracterizada principalmente por 3 tipos de mangle, el blanco, negro y rojo, carrizos, nenúfares, lirios, palmas de coco, plátanos, palo de tinte, arbustos, hierbas, entre otros. La fauna se conforma por diversas especies tanto terrestres, acuáticas y aéreas, entre estas se encuentran los bagres, mojarra, peces aguja, caracoles chivitas, ranas, tortugas, lagartos, gavilanes caracoleros, patos, cormoranes, tucanes, garzas americanas, nutrias (o perros de agua), estromatolitos, entre otros (Herrera, 2017).

Clima

El Estado de Quintana Roo, según con la clasificación de Köppen, tiene un clima Aw (tropical con lluvias en verano) y Am (tropical con lluvias de monzón), Enriqueta García hizo modificaciones de esta clasificación para México en el año de 1980, el clima Aw tiene tres subtipos a los cuales, uno lo presenta el sur del estado en donde se encuentra el municipio de Bacalar (Casa Madrid y Casa Madrid, 2017).

Aw1: Con características de hasta 1,300 mm de lluvia anual.

Con respecto a la precipitación en el Estado, solía darse de manera regular entre los meses de mayo a septiembre, pero pasados 10 años las lluvias han variado, dándose de manera irregular, con largos periodos largos de sequía (Casa Madrid y Casa Madrid, 2017).

La temperatura media anual en todo el estado de Quintana Roo, es de 26°C, la temperatura máxima promedio es de 33°C y se presenta en los meses de abril a agosto, la temperatura mínima promedio es de 17°C durante el mes de enero. El clima cálido subhúmedo que está presente en el municipio de Bacalar, favorece enormemente el cultivo de la caña de azúcar, chile jalapeño, maíz, arroz, hortalizas y frutales como chicozapote, naranja, toronja, papaya, limón agrio, mango y piña, entre otras (INEGI, 2009).

Hidrografía

El suelo del municipio de Bacalar, tiene una característica que ayuda mucho al flujo de las grandes cantidades de agua de lluvia, la cual es la permeabilidad. Por esta razón, el relieve no tiene ríos superficiales, pero si tiene causas subterráneos de gran longitud (Herrera, 2017). De acuerdo con Gómez (1998), a pesar de que la precipitación pluvial es considerable, el agua de lluvia se infiltra en la capa de roca caliza y forma sus cauces subterráneos. Esta no es una zona de ríos superficiales, pero si existen varias lagunas por toda la superficie municipal. En temporada de lluvias, algunas lagunas llegan a conectarse superficialmente mediante pequeños y efímeros canales.

Dentro de las lagunas más reconocidas dentro del municipio de Bacalar, se encuentra la laguna San Felipe, laguna La virtud, laguna de Chac-Choben y laguna de Bacalar o laguna de los 7 colores; por otra parte, existen lagos que se conocen como: San Antonio, lago Teresita, lago Nohbec, lago Chochoba, lago Peten Tulix, entre otros (Herrera, 2017).

La laguna de Bacalar contiene 4 cenotes, tres de ellos están integrados a la laguna (Cenote de la bruja o Cenote Negro, Cenote Esmeralda y Cenote Cocalitos) y el otro denominado Cenote Azul está en fase de dilución, pero mantiene su estructura

primigenia; cada uno de los cenotes contiene un ojo de agua o más, que están llenando permanentemente de aguas subterráneas, con elevados porcentajes de carbonato de calcio a la laguna de Bacalar (Herrera, 2017).

Laguna de Bacalar o Laguna de los 7 colores

La laguna de los 7 colores es conocida así porque se reflejan espectralmente varias tonalidades de azul en la superficie, producidas por dos principales efectos: la combinación de las diferentes profundidades de la laguna y la posición del sol (Gómez, Barrasa, y García, 2018). Su formación geofomológica fue debida por una dinámica tectónica de placas ocurrida en el Mioceno superior que produjo varias zonas de fracturas en la Península de Yucatán, la grieta geológica de la Laguna de Bacalar tiene una extensión territorial de 42 km², la cual se alimenta de agua subterránea por el litoral que proviene de zonas relativamente altas del noroeste de la Península (Gómez, Barrasa, y García, 2018).

Tiene 2 kilómetros en la parte más ancha, su profundidad media es de 8 metros con un canal en la parte central de aproximadamente 15 metros de profundidad, hacia el norte el fondo es fangoso y las aguas en gran parte del año son turbias, en el centro de la laguna el agua es clara pero con una capa gruesa de detrito en el fondo y hacia el sur, las aguas son transparentes y el fondo predominante arenoso (Oliva, Ocaña, Navarrete, Jesús, y Vargas, 2016).

Presenta varios cenotes ubicados hacia el sur, donde se destacan el cenote azul y el cenote negro, en algunas áreas las orillas son rocosas y hacia el centro y sur de la laguna se encuentran zonas con estromatolitos, la vegetación predominante que rodea la laguna está compuesta fundamentalmente por manglares, así como la presencia de zonas con tulares y diversas plantas acuáticas (Oliva, Ocaña, Navarrete, Jesús, y Vargas, 2016).

Cenote Negro o Cenote de la Bruja.

Este cenote se encuentra en dentro de las aguas de la laguna de Bacalar y a las orillas de este, se encuentra el Centro Regional de Educación Normal (CREN) y

otros terrenos privados. Este cenote está conectado con la laguna de manera superficial. Se le conoce como cenote de paredes verticales (Gómez J. , 1998). Esta formación kárstica tiene un diámetro de 130 metros y una profundidad que cambia de metro a medio metro hasta casi 100 o más metros (Turismo México, 2021). Dentro de este hermoso cenote puede hallarse todo un ecosistema, existe una variedad de plantas y animales acuáticos. Ahí vive una fauna de peces de diferentes especies y colores. Los hay pequeños como las sardinas y otros de mediano tamaño como las mojarras. Algunos árboles tienen sus raíces arraigadas a las paredes del cenote, entre estos están los manglares, los palos de tinte y algunas palmas. También están los nenúfares, los carrizos y otras plantas que resguardan entre sus tallos y hojas a los peces de menor tamaño (Gómez J. , 1998).

Cenote Esmeralda.

Se localiza en la costa del Hotel “Laguna Bacalar”, en la Av. 1, llamada La Costera. Es el cenote más grande de la ciudad de Bacalar. Recibe el nombre de Cenote Esmeralda por el color de sus aguas, tono esmeralda, distinto al tono de la laguna (Morales, 1994). Se le conoce como cenote en forma de aguada, porque sus paredes están en forma de embudo, es decir, en diagonales (Gómez J. , 1998). Este cenote tiene pequeños peces y poca vegetación de manglar alrededor de su costa. El diámetro de este cuerpo de agua, es de 300 metros y tiene una profundidad aproximadamente de 70 metros (Arduinna, S.A., 2020).

Cenote Cocalitos o Cenote de los Estromatolitos.

Se ubica en las orillas del balneario llamado Cocalitos y es por eso que se le llama por ese nombre. Es el último cenote del lado Sur que se encuentra dentro de la laguna de Bacalar. Se le conoce como cenote en forma de aguada (Gómez J. , 1998). En él viven pequeños peces, pero la característica principal es que en este cenote se encuentran gran variedad de microbialitas gigantes, llamados de igual manera estromatolitos. En este Cenote, se han realizado varias investigaciones sobre estos microorganismos por parte de investigadores de las universidades de Estados Unidos y de la UNAM. Los estromatolitos han sido estudiados también por biólogos locales, como es el caso del Biólogo Martín, que tiene su laboratorio en el

COBACH Plantel Bacalar. Tiene un diámetro de 230 metros y una profundidad de 70 metros (Arduinna, S.A., 2020).

Cenote Azul.

Este un cuerpo de agua tiene un diámetro 200 metros y tiene una profundidad de más de 90 metros de profundidad originado por las formaciones cársticas, es una abertura en forma circular que muestra capas delgadas de estratos calizos, sus aguas transparentes permiten observar la profundidad de más de 30 metros (Cazal y Hernández, 2015).

La característica principal es que en las orillas del cenote hay un restaurante que se llama de la misma manera: Restaurante Cenote Azul. Los terrenos a su alrededor no están ocupados y eso permite que la flora y la fauna se desarrollen alrededor y dentro del cenote. Aquí hay tres ecosistemas que interactúan entre ellos, la selva, el manglar y el cenote (acuático). Los peces del cenote son de mediano tamaño a comparación de los demás, esto es porque además de su alimento natural, reciben los restos de comida del restaurante (Lagos, 2015).

Áreas Naturales Protegidas (ANP)

Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an:

La Reserva de la biosfera de Sian Ka'an, es la principal y más importante reserva en la península de Yucatán (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2016). Esta reserva fue declarada como tal en el año 1987, por mucho ha sido reconocida por su belleza paisajística en la región y el mundo por los servicios ambientales que otorga, en especial los reservorios de Carbono que se han encontrado en sus manglares. Como fauna tiene una gran diversidad de animales tales como, el jaguar, el tapir, el manatí y el pecarí, por otra parte, cuenta con un sistema de ríos subterráneos los cuales se interconectan con cenotes y Petenes, únicos en la Península de Yucatán (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2016).

La Reserva tiene una superficie de 528 mil 148 hectáreas. Junto con el Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil y la Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian

Ka'an conforman el Complejo Sian Ka'an con un área de 652 mil 192.97 hectáreas y comparten un solo programa de manejo. Están situadas en los municipios de Felipe Carrillo Puerto, Tulum, Bacalar y Othón P. Blanco, en el estado de Quintana Roo (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2016).

Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil, Q. Roo

Tal como se menciona, Uaymil forma parte del complejo integrado por la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y sus arrecifes. Por sí misma, tiene una extensión territorial de 89 mil hectáreas y está ubicada en los municipios de Felipe Carrillo Puerto, Bacalar y Othón P. Blanco, en el estado de Quintana Roo, la cual fue decretada como Área de Protección de Flora y Fauna el 17 de noviembre de 1994 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016). Esta área posee uno de los ecosistemas más importantes de la región, designado como humedal de Importancia Internacional por la Convención de Ramsar, está considerada también una región marina e hidrológica prioritaria por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

La vegetación que conforma Uaymil está cubierta por selvas medianas y bajas, así como por humedales de agua dulce (manglares, petenes, sabanas, tasistales y cenotes), flora diversa como: chechem negro, chicozapote, chaca o palo mulato, nance, habin, guayabillo, despeinada, palma kuka y pucte. Como fauna representativa se tienen a las siguientes especies: jaguar, puma ocelote, tigrillo, leoncillo, tapir, saraguato de Manto, venado cola blanca, oso hormiguero, flamenco, tepezcuintle, cocodrilo de pantano y tortugas verde, caguama y carey (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

Bala'an Ka'ax

Fue decretada el día 3 de mayo del año 2005 como Área de Protección de Flora y Fauna Bala'an Ka'ax, está ubicada en los municipios de José María Morelos y Bacalar, Quintana Roo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016). Es considerada por la región como una pieza importante para el desarrollo del

Corredor Biológico Sian Ka'an-Calakmul, ya que une a las reservas de la biosfera que lo componen y fortalece directamente al Corredor Biológico Mesoamericano, por otra parte, constituye una cadena de protección y manejo forestal y de fauna silvestre que garantiza la interconectividad de los ecosistemas y la permanencia de las selvas peninsulares en la denominada Selva Maya (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

Sus selvas bajas inundables brindan importantes servicios ambientales a las comunidades de su alrededor, como el aporte de agua para consumo humano, cuyo flujo de agua, viaja de forma subterránea hacia la costa, donde baña a los humedales de Sian Ka'an y de la misma forma genera nutrientes que alimentan a los arrecifes de coral y los cenotes. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001, en Bala'an Ka'ax existe una diversidad de especies de fauna silvestre consideradas en riesgo, entre las especies emblemáticas figuran animales como el mono araña, mono aullador, puma, jaguar, ocelote, viejo de monte, cigüeña jabirú, pavo ocelado, zopilote rey, cocodrilo de pantano, boa, falsa coralillo de Yucatán, así como especies de importancia en la economía local como el venado cola blanca, armadillo, venado cabrito, mapache y hocofaisán (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

Se considera que en Bala'an Ka'ax se hospeda gran variedad de especies de hongos macromicetos, es el hábitat de gran variedad de fauna y aves como el tucán (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016).

ANP competencia estatal:

Parque Ecológico Estatal-Parque Laguna de Bacalar

Tiene una superficie de 5.36 hectáreas y fue decretada como área natural protegida el 1 de abril de 2011, colinda con la laguna de Bacalar, dentro de la vegetación que presenta esta ANP se encuentra el manglar, pastizal en proceso de reforestación (IBANQROO, 2016). Como principales impactos ambientales que ha sufrido esta ANP está la erosión costera y el deterioro de la calidad del agua, como tal este parque ecológico funciona como un balneario, área para campamento y actividades

de educación ambiental. De igual forma se contempla como una propuesta de sitio Ramsar como corredor transversal costero Bahía de Chetumal – Bacalar (IBANQROO, 2016).

Área destinada voluntariamente a la conservación:

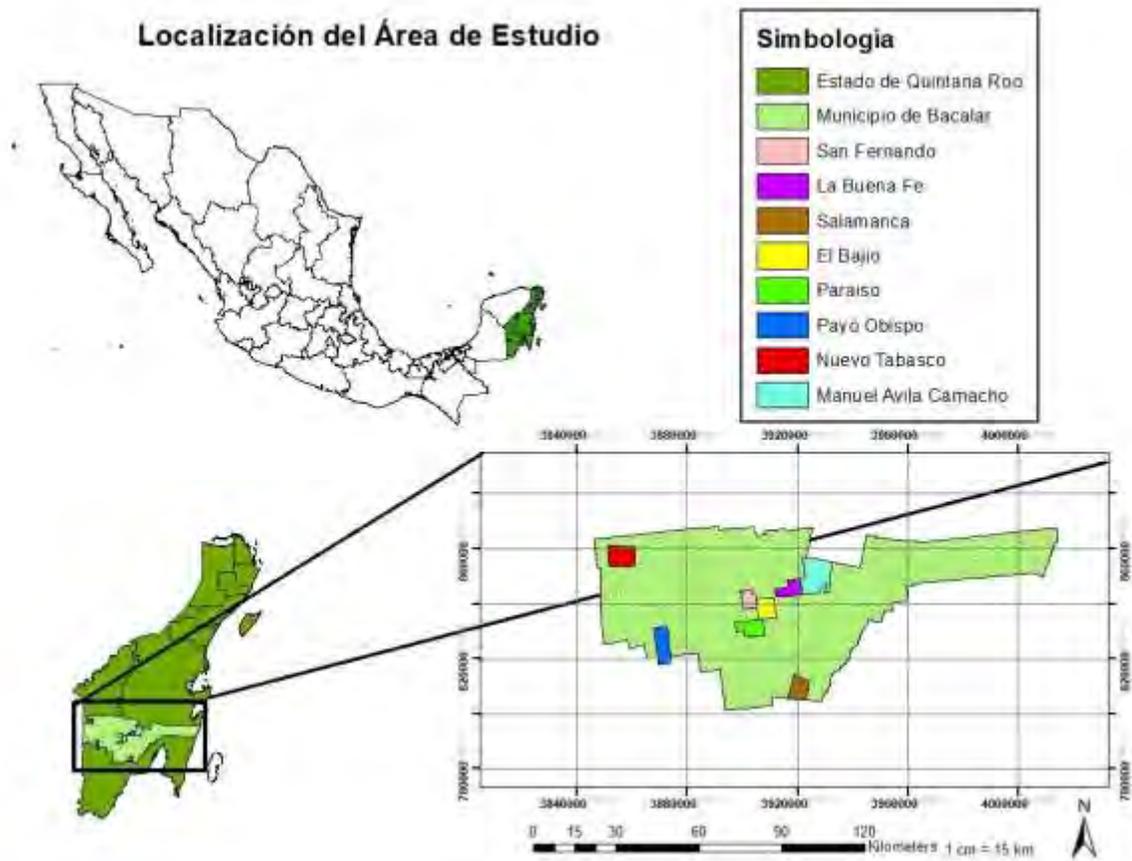
Huub'sak

Es un área natural protegida de carácter voluntario, registrada ante la CONANP, que se enfoca en el rescate y conservación de la selva y el disfrute de la naturaleza con el mínimo impacto ambiental (HUUBSAK, 2016), fue registrada como tal el 18 de noviembre del año 2010, cuando Bacalar aún estaba en proceso de convertirse en municipio y este pertenecía todavía al municipio de Othón P. Blanco, tiene una extensión territorial de 49.92 hectáreas (Elizondo, 2016).

Capítulo 1. Marco teórico.

1.1. Área de estudio.

El municipio de Bacalar se encuentra al sur del Estado de Quintana Roo, al Sur de la República Mexicana y cuenta con 56 ejidos de los cuales 8 ejidos comprenden nuestra área de estudio y son: San Fernando, La Buena Fe, Salamanca, El Bajío, Paraíso, Payo Obispo, Nuevo Tabasco y Manuel Ávila Camacho, como se muestran en el siguiente mapa.



Mapa 2 Área de estudios, ejidos seleccionados dentro del municipio de Bacalar. Fuente: Elaboración Propia.

Los ejidos Manuel Ávila Camacho, El Bajío, La Buena Fe y Nuevo Tabasco cuentan con una agricultura de temporal anual, el tipo de vegetación de estos ejidos es secundaria arbórea de selva baja espinosa/mediana subperennifolia y secundaria arbustiva de selva baja/mediana subperennifolia, su uso de suelo: pastizal cultivado. De acuerdo con los datos de la SEMARNAT cuentan con 3 cuerpos de agua, perenne cercanos, que son: Chicoasén, Juan Sabines y Resendio Salazar, los tres

de tipo Presa. Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) Federales cercanas a estos ejidos son: Bala'an K'aax, Uaymil y Sian Ka'an (Registro Agrario Nacional, 2019).

El ejido Paraíso, maneja un uso de suelo denominado pastizal cultivado y la agricultura es temporal anual. La vegetación de este se caracteriza por ser secundaria arbórea de selva baja espinosa subperennifolia y secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia. Los cuerpos de agua cercanos son 3, al igual que los ejidos mencionados en el párrafo anterior. Las ANP Federales cercanas son Bala'an K'aax con una distancia aproximada de 20 km al ejido, Calakmul distancia aproximada 46 km y Uaymil distancia aproximada 54 km (Registro Agrario Nacional, 2019).

San Fernando, su uso de suelo es pastizal cultivado y pertenece a la selva baja espinosa subperennifolia, siendo su vegetación secundaria arbórea y arbustiva de selva mediana subperennifolia. Cuentan con 3 cuerpos de agua, perenne cercanos, que son: Chicoasén, Juan Sabines y Resendio Salazar; y las ANP Federales cercanas a este ejido son: Bala'an K'aax, Calakmul y Uaymil (Registro Agrario Nacional, 2019).

Payo Obispo, el uso de suelo, al igual que los demás ejidos mencionados, es pastizal cultivado. Su vegetación por otra parte es secundaria arbórea de selva baja/mediana espinosa subperennifolia y secundaria arbustiva de selva baja espinosa subperennifolia. Y de la misma forma tiene cercanía con los cuerpos de agua Chicoasén, Juan Sabines y Resendio Salazar, sus ANP Federales cercanas son Bala'an K'aax, Calakmul y Uaymil (Registro Agrario Nacional, 2019).

Superficie de los núcleos de los ejidos.

Tabla 1 Superficie de los Núcleos Agrarios.

Ejido	Superficie del plano general del Núcleo (ha)	Superficie Actual del Núcleo (ha)
San Fernando	3,250.000000	3,233.520779
La Buena Fe	4,250.000000	4,211.309260
Salamanca	5,000.960391	4,999.997448
El Bajío	5,150.000000	4,981.664771
Paraíso	5,300.000000	5,294.624746
Payo Obispo	6,249.501762	6,316.540967
Nuevo Tabasco	7,024.441300	7,236.776795
Manuel Ávila Camacho	12,000.000000	10,750.503100

Fuente (Registro Agrario Nacional, 2019).

*Nota: Las cantidades representadas en color rojo en la tabla representan una ocupación mayor a la que corresponde el núcleo agrario.

1.2. Deforestación y cambios de uso de suelo

Un ecosistema es un sistema conformado por organismos vivos y el medio físico en donde se relacionan. La conservación de estos es de gran importancia, un número mayor de especies o biodiversidad en un ecosistema proporciona una mejor y mayor capacidad de recuperarse, debido a que estas pueden absorber y reducir los diferentes efectos de los cambios ambientales y/o del cambio climático en la estructura total del ecosistema (AQUAe FUNDACIÓN, s.f.).

De acuerdo con la SEMARNAT, se describe como cambio de uso de suelo a la transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos o degradar la calidad de la vegetación modificando la densidad y la composición de las especies presentes (SIIAEC, 2017). De los factores que más se destacan en para el cambio de uso de suelo son la agricultura, la ganadería y la ampliación de infraestructuras para el desarrollo del urbanismo en los pueblos y ciudades.

La **Vegetación** puede describirse de varias maneras de acuerdo a la modificación que presente sobre el suelo, si esta no ha sido modificada o la modificación ha sido

ligera, entonces la vegetación se clasifica como natural y se considera primaria; si de otra forma la modificación es una remoción parcial, la clasificación es secundaria y como última clasificación existe la cobertura antrópica que se describe como un caso extremo de transformación, esta consiste en la eliminación por completo de la cubierta vegetal para dedicar el terreno a actividades agrícolas, pecuarias o zonas urbanas (SEMARNAT, 2005).

La **vegetación** forestal es el conjunto de plantas y hongos que crecen y se desarrollan en forma natural, formando bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas, y otros ecosistemas, dando lugar al desarrollo y convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales (SEMARNAT, 2020).

La **deforestación** es aquella pérdida de la vegetación forestal, por causas inducidas o naturales, a cualquier otra condición. La deforestación implica la pérdida duradera o permanente de la cubierta forestal y la transformación del bosque en tierras dedicadas a otros usos (SEMARNAT, 2020).

El cultivo de la tierra o bien denominado agricultura, es un conjunto de actividades y conocimientos desarrollados por el hombre, destinados a cultivar la tierra y cuya finalidad es obtener productos vegetales, cereales, pastos, entre otros para la alimentación del ser humano y el ganado, y bien para sustentar la economía de quien se dedica a este.

Con el paso de los años la tecnología ha ido sustituyendo a las herramientas tradicionales para la agricultura, de acuerdo a las herramientas que se utilicen para realizar actividades agrícolas se han denominado 2 tipos de agricultura, la agricultura extensiva o tradicional, la cual se basa en utilizar recursos naturales como abono animal para fertilizar la tierra y en la mayoría de las ocasiones no se cuenta con un sistema de riego y más bien el cultivo depende de las lluvias para su desarrollo por otra parte la mayoría de las herramientas que utiliza para este desarrollo son de carácter manual y como segundo tipo está la agricultura intensiva o moderna, como su nombre lo dice, este tipo de agricultura usa intensivamente la tierra, ya que esta es utilizada dos veces al año (primavera-verano y otoño-invierno),

empleando fertilizantes y plaguicidas, grandes maquinarias y sistemas de riego (SAGARPA, 2020).

1.3. Aplicación de tecnologías geoespaciales a los estudios ambientales.

Gracias a las tecnologías geoespaciales, se han desarrollado buenos sistemas de información geográfica, los cuales han modernizado nuestros ámbitos de monitoreos y representaciones en relación a procesos específicos de cambio de la cobertura forestal (Nuñez, 2017).

Sistema de Información Geográfica (SIG), es un marco para recopilar, gestionar y analizar datos, este marco se ha ocupado para muchos campos que brindan información, a través de mapas y análisis de los mismos (SIGSA, 2020).

Percepción Remota

Es un proceso de adquisición de información a distancia, sin que exista contacto físico entre la fuente de información (objeto) y el receptor de la misma (sensor). Como fuentes de información tenemos las rocas, el agua, la arena, el suelo, la vegetación, etc. Cada objeto de la superficie terrestre tiene su firma única espectral.

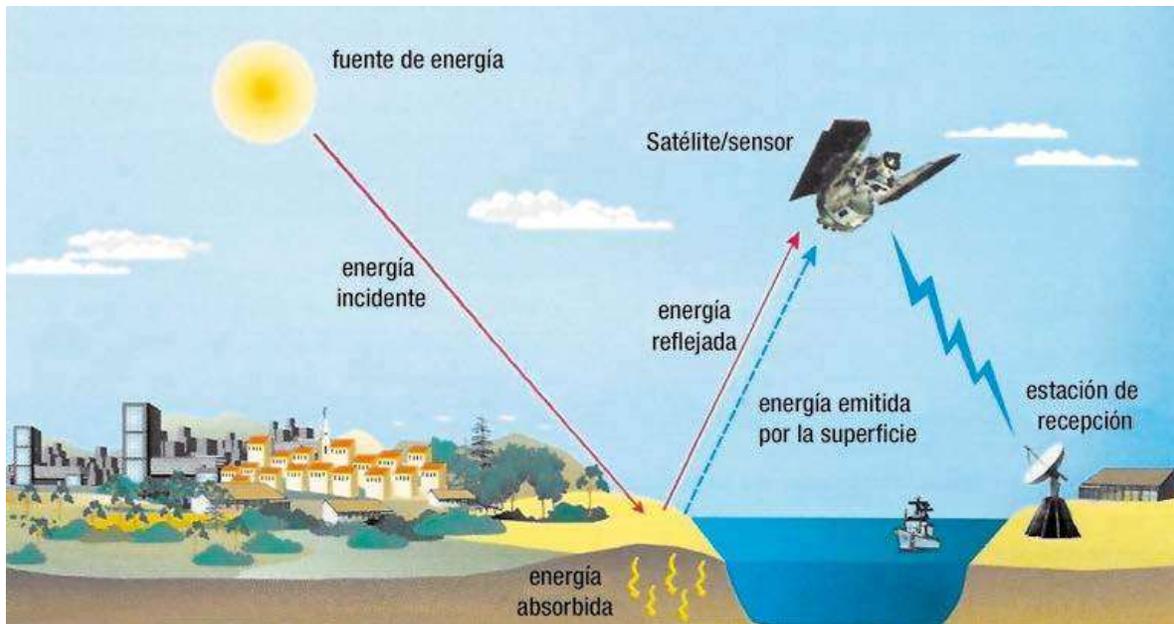


Ilustración 1 Percepción Remota. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Elementos-de-la-etapa-de-adquisicion-de-datos-por-teledeteccion-o-adquisicion_fig9_303652549

Para poder trabajar con la percepción remota es esencial saber los principios fundamentales para la teledetección, los cuales son los siguientes:

- **Resolución Espacial**, de un conjunto de datos (tamaño de pixel o celda), se refiere al área en el suelo que está representada por un elemento, y está directamente relacionado con el tamaño de la característica más pequeña que se puede ser detectada.
- **Resolución Espectral**, se refiere al número de bandas y la anchura de banda espectral o intervalos de longitud de onda específica en el espectro electromagnético sensibles a los detectores de un sistema sensor de control remoto.
- **Resolución Radiométrica**, esta se refiere a la capacidad de un sensor remoto para discriminar variabilidad en las diferencias de radiancia, el nivel de brillo va de 0 a 255 niveles.
- **Resolución Temporal**, es el periodo de revisita de un sensor de satélite. Es la longitud de tiempo que le toma a un satélite para completar un ciclo de órbita.

Adquisición de imágenes

Los satélites artificiales hechos por el ser humano, han ido evolucionando a través de los años, estos satélites se mueven entorno a objetos más grandes que ellos. Los usos de estos satélites varían, algunos utilizan los datos captados, para la elaboración de mapas, para prever las condiciones atmosféricas del planeta, y también para los sistemas de telecomunicación, todos estos funcionan a través de una red de satélites artificiales (GeoEnciclopedia, 2016).

En cuanto a los tipos de satélites, hay dos tipos básicos de estos, los geoestacionarios se mueven de este a oeste por encima del ecuador, siguiendo la dirección de la rotación de la tierra y los polares viajan de polo a polo, en dirección norte-sur (GeoEnciclopedia, 2016).

Dentro de las clasificaciones de los satélites, entra una muy importante y es la de los satélites de teledetección de recursos naturales, los cuales son de órbita polar y son diseñados para la observación del ambiente del planeta y la evaluación de los diversos recursos naturales, el primero y más conocido de estos, es el programa Landsat, el cual hizo su primer lanzamiento en el año 1972 con su satélite Landsat-1, también están los satélites de programa SPOT (*Systeme Probatoire d'Observation de la Terre*) de iniciativa francesa, Envisat de la Agencia Espacial Europea, IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*), Terra por la NASA que tiene cuatro captadores que miden aspectos específicos de nuestro planeta los cuales son: ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MISR (*Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*), MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) Y MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) (Vivancos, et. Al., 2005).

Landsat 7

Landsat 7 fue lanzado en un cohete Delta II el 15 de abril de 1999 desde el campo de pruebas occidental de la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, California. El instrumento de observación de la Tierra en Landsat 7, el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) cuenta con las siguientes características (Baumann, 2010):

- 1) Una Banda Pancromática con una resolución espacial de 15 m.
- 2) A bordo, apertura total, calibración radiométrica absoluta al 5%.
- 3) Un canal IR (Infrarrojo) térmico con una resolución espacial de 60 m.
- 4) Grabador de datos de placa.

Tabla 2 Especificaciones del Landsat 7 ETM +.

Sensor		# Banda	Longitud de onda (μm)	Geo. Resolución
ETM+	Azul visible	1	0.45 a 0.52	30 m
	Verde visible	2	0.52 a 0.60	30 m
	Rojo visible	3	0.63 a 0.69	30 m
	IR cercano	4	0.76 a 0.90	30 m
	IR medio	5	1.55 a 1.75	30 m
	IR termal	6	10.4 a 12.5	60 m
	IR medio	7	2.08 a 2.35	30 m
	Pancromático	8	0.50 a 0.90	15 m

Fuente: (Baumann, 2010)

Landsat 7 Tiene una cobertura de la Tierra que opera en una órbita repetitiva, circular, sincrónica al sol, casi polar a una altitud nominal de 705.3 km medida en el ecuador. El tiempo del nodo orbital descendente es de 9:45 a.m. +/- 15 minutos en el ecuador con un período orbital de 98.9 minutos, completando 14 y 9/16 órbitas por día y viendo la tierra entera cada 16 días (Baumann, 2010).

Landsat 8

El satélite Landsat 8 se lanzó el 11 de febrero de 2013, desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, en un cohete Atlas-V 401, la carga del satélite Landsat 8 consta de dos instrumentos científicos: el *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor de

infrarrojos térmicos (TIRS). Estos dos sensores proporcionan una cobertura estacional de la masa terrestre global a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR), 100 metros (térmico) y 15 metros (pancromático) (Rocchio, Taylor, y Masek, s.f.).

Landsat 8 tiene una resolución temporal de revisita cubriendo el globo cada 16 días (excepto altitudes polares), órbita heliosíncrona de 705 km, 233 ciclos orbitales; cuenta con una resolución radiométrica de 12 bits, tiene un período de 98.9 minutos (Pons, 2009).

Tabla 3 Especificaciones de Landsat 8

No. De Banda	<i>Landsat-8 OLI and TIRS Bands, resolución espacial y onda corta (µm)</i>	
Banda 1	<i>30 m Coastal/Aerosol</i>	<i>0.435 - 0.451</i>
Banda 2	<i>30 m Blue</i>	<i>0.452 - 0.512</i>
Banda 3	<i>30 m Green</i>	<i>0.533 - 0.590</i>
Banda 4	<i>30 m Red</i>	<i>0.636 – 0.673</i>
Banda 5	<i>30 m NIR</i>	<i>0.851 – 0.879</i>
Banda 6	<i>30 m SWIR-1</i>	<i>1.566 – 1.651</i>
Banda 10	<i>100 m TIR-1</i>	<i>10.60 – 11.19</i>
Banda 11	<i>100 m TIR-2</i>	<i>11.50 – 12.51</i>
Banda 7	<i>30 m SWIR -2</i>	<i>2.107 – 2.294</i>
Banda 8	<i>15 m Pan</i>	<i>0.503 – 0.676</i>
Banda 9	<i>30 m Cirrus</i>	<i>1.363 – 1.384</i>

Fuente: (Rocchio, Taylor, y Masek, s.f.)

Las diferencias entre Landsat 7 (L7) y Landsat 8 (L8), es que las imágenes de L7 consisten en tener 8 bandas diferentes con una resolución espacial de 30 metros de la banda 1 a la banda 7 y la resolución espacial de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros, por otro lado las imágenes de L8 consisten de 9 bandas con resoluciones de 30 metros de la banda 1 a la banda 7 y la banda 9, la resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros, la banda 1 (Ultra-Azul) sirve para estudios costeros y de

aerosol, y la banda 9 es usada para la teledetección de nubes cirrus (GisGeek, 2014).

Índice de vegetación

Es una combinación matemática de dos o más bandas espectrales que mejora el contraste entre la vegetación (que tiene alta reflectancia) y el suelo desnudo, las estructuras artificiales, el hormigón, etc., así como cuantificar las características de la planta como la biomasa, el vigor, la densidad, etc. (Toribio, 2019).

NDVI

La vegetación tiene una firma espectral única, su reflectancia de energía depende de la clorofila, en verano la clorofila es mayor. Las hojas sanas actúan como excelentes reflectores de longitudes de onda del Near IR o Infrarrojo Cercano.

La percepción remota hace uso del Infrarrojo Cercano (Near IR), la región visible en el espectro electromagnético es la porción que el ojo humano puede detectar, representada por tres colores denominado RGB por sus nombres en inglés, R (Red-Rojo) 0.4 a 0.5 μm , G (Green-Verde) 0.5 a 0.6 μm y B (Blue-azul) 0.6 a 0.7 μm .

El Índice de Vegetación de Diferencia Normaliza (o NDVI por sus siglas en inglés), es un índice utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación o bien calcular la salud de la vegetación a través de los sensores remotos como las imágenes satelitales. El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general, permitiendo también definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento (Toribio, 2019), la fórmula para calcular este índice a través de imágenes satelitales es la siguiente (Agencia Espacial Mexica, 2017):

$$NDVI = \frac{IRCercano - Rojo}{IRCercano + Rojo}$$

El cálculo de este índice es una operación entre bandas, IR Cercano (Infrarrojo Cercano) y Rojo, donde los valores utilizados son las reflectancias de cada una de las bandas de la imagen satelital; mientras más altos sean los valores calculados

por este índice indican que la calidad y cantidad de vegetación son mayores (Agencia Espacial Mexica, 2017).

La banda roja está relacionada con el contenido de clorofila (elevada absorción), y la banda del infrarrojo está relacionado con la estructura de las células foliares (elevada reflectividad), cabe destacar que los valores de este cálculo son de -1 a 1, los cuales representan la salud vegetal de las plantas (Rodrigo Villar, 2015). En la siguiente tabla se presentan 5 rangos con diferentes intervalos que van de 0.1 a 0.6 o más.

Tabla 4 Intervalos del rango de salud vegetal.

Correlación colorimétrica entre valores de NDVI y factores biológicos:		
COLOR	RANGO DE NDVI	FACTOR BIOLÓGICO
ROJO	$\leq 0.1 - 0.3$	Vegetación escasa o baja densidad de siembra
NARANJA	0.3 - 0.4	vegetación enferma y/o con plagas
AMARILLO	0.4 - 0.5	vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes
VERDE CLARO	0.5 - 0.6	vegetación con deficiencia leve de nutrientes
VERDE OSCURO	0.6 - 1	Vegetación saludable.

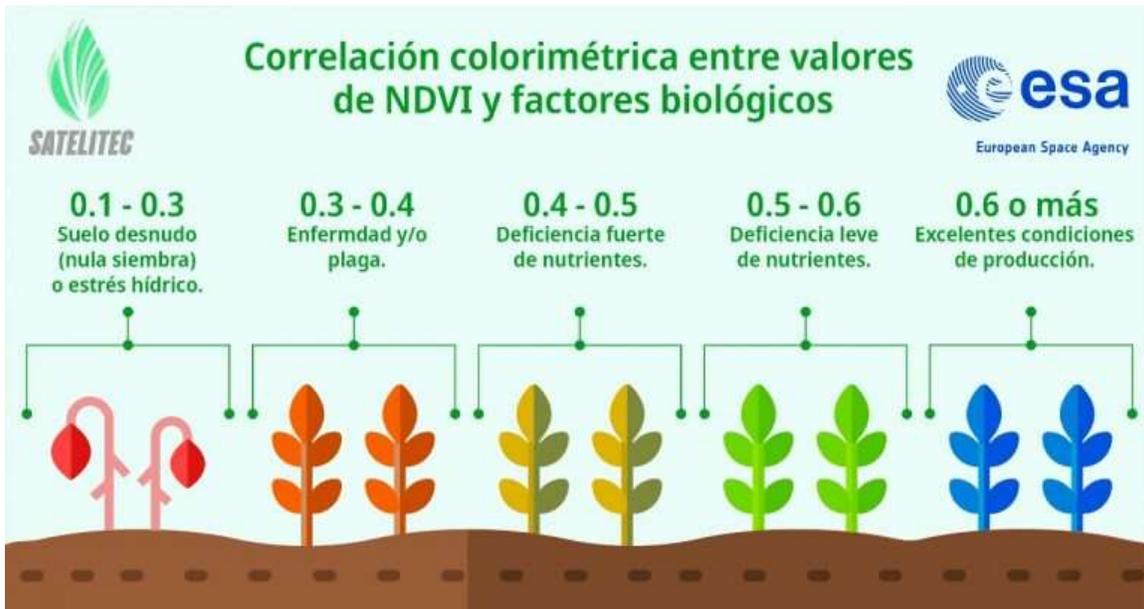


Ilustración 2 Correlación colorimétrica entre valores de NDVI y factores biológicos. Fuente: <https://satelitec.mx/blog/2021/02/06/ndvi-la-herramienta-gratuita-1-para-el-monitoreo-agricola-%F0%9F%94%B0%F0%9F%92%BB%F0%9F%9B%B0%F0%9F%92%AF/>

Las plantas sanas tienden a ayudar de muchas formas al ambiente, aportando oxígeno el cual es vital para los seres vivos y de igual forma a reflejar y absorber la energía que aporta la luz solar, en la siguiente ilustración se muestran los diferentes porcentajes de la reflectancia que tienen las plantas saludables y poco saludables (Bello, 2021).

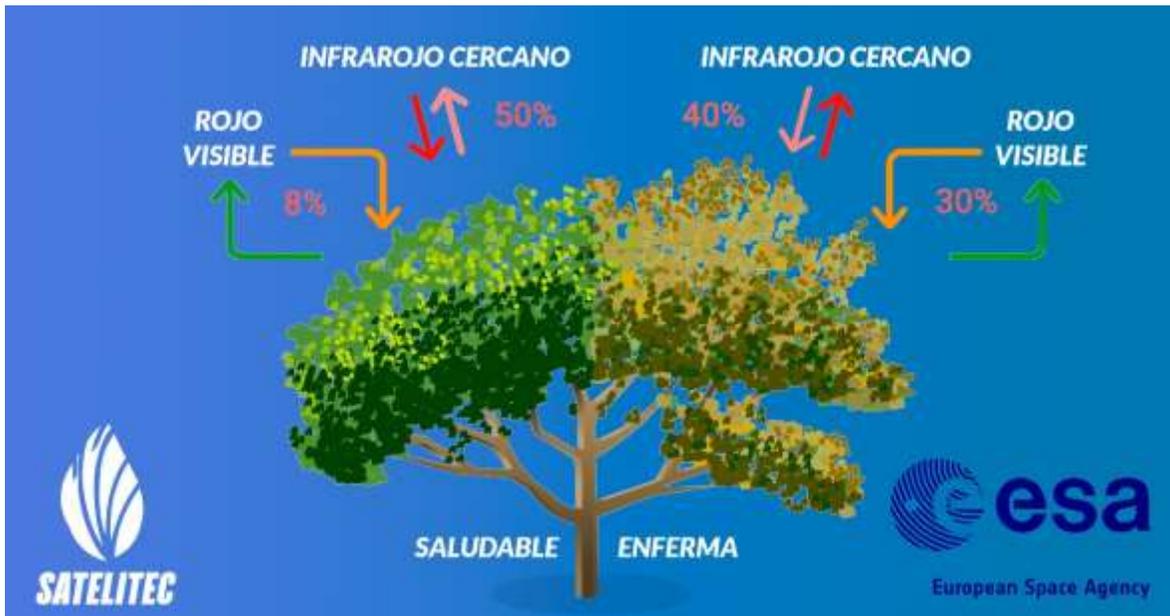


Ilustración 3 Luz roja visible absorbida y luz infrarroja cercana reflejada. Fuente: <https://satelitec.mx/blog/2021/02/06/ndvi-la-herramienta-gratuita-1-para-el-monitoreo-agricola-%F0%9F%94%B0%F0%9F%92%BB%F0%9F%9B%B0%F0%9F%92%AF/>

En la ilustración 3, se describe cómo funciona la cantidad de luz roja visible absorbida y la infrarroja cercana reflejada, por las plantas sanas y enfermas. Este fenómeno sucede debido a la cantidad de clorofila que tienen las plantas, por mucho una planta sana puede absorber mayor cantidad de la luz roja visible y también refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana (Bello, 2021).

Capítulo 2. Metodología para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

2.1. Estimación del NDVI

Recolección de información sobre los diferentes ejidos.

Junto a su gran biodiversidad, aproximadamente 56 ejidos conforman el municipio de Bacalar. La selección de los ejidos como área de estudio fue por la práctica de la agricultura extensiva, esta información fue recuperada a través de diferentes fuentes informativas como artículos de investigación, notas de periódicos, entre otras se llevó a cabo la discriminación para seleccionar los puntos de interés, seguido de este proceso se utilizó la información que nos brinda el Padrón e Historial de Núcleos Agrarios (PHINA), en este padrón se describen la superficie del plano general y la superficie de uso común ambas referentes al núcleo, el número de ejidatarios, así como la fecha de inscripción a las diferentes Acciones Agrarias, entre otros y el Registro Agrario Nacional (RAN), el cual contiene los indicadores de cada ejido registrado (como los cuerpos de agua cercanos, zonas arqueológicas cercanas, Áreas Naturales Protegidas cercanas, etc.).

Los ejidos seleccionados fueron: San Fernando, La Buena Fe, Salamanca, El Bajío, Paraíso, Payo Obispo y Nuevo Tabasco, ordenados de menor a mayor con respecto a la superficie del núcleo agrario.

2.1.2. Recolección de imágenes satelitales, a través de la Percepción Remota.

GloVis, es una plataforma que pertenece a la USGS (*United States Geological Survey por sus siglas en inglés*) es una herramienta que sirve de visor en el que se puede acceder a datos de teledetección (USGS, 2020), a través de esta plataforma se navegó para poder recolectar imágenes de dos de los satélites existentes (Landsat 7 y Landsat 8).

Los criterios que se utilizaron para la selección de las imágenes satelitales fueron las siguientes:

- Ubicación: Sistema de Referencia Mundial (WRS), el cual permite consultar sobre imágenes satelitales a través de los números Path 19, Row: 47, se

contempló esta ubicación ya que los ejidos que se usan como área de estudio se encuentran dentro de los píxeles que contiene la imagen.

- Año de captura: 2000, 2004, 2008, 2013, 2017 y 2020.
- Tipo de satélite Landsat 7 para el año 2000, 2004, 2008 y 2013 y Landsat 8 para los años 2013, 2017 y 2020.
- Porcentaje de nubosidad (nula o casi nula) o imagen limpia, para tener un buen resultado al momento de calcular el NDVI, la imagen debe de contener lo más mínimo de nubosidad para evitar que los resultados arrojen falsos positivos.

Por otra parte, en las imágenes descargadas se contemplaron 4 principios fundamentales de la teledetección:

- Resolución Espacial: para ambos satélites (Landsat 7 y Landsat 8) es de 30 metros.
- Resolución Espectral: Landsat 7 tiene 8 bandas de las cuales solamente 2 se ocuparon para calcular el NDVI, las cuales fueron la Banda 3 Rojo Visible y la Banda 4 Infra Rojo Cercano (NIR) y Landsat 8 tiene 11 bandas de las cuales solo 2 se utilizaron la Banda 4 Rojo Visible y la Banda 5 NIR.
- Resolución Radiométrica.
- Resolución Temporal.

Fórmula para calcular los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Para poder calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se contemplaron dos bandas de los satélites Landsat 7 y Landsat 8, estos se seleccionaron para obtener las imágenes, debido a las fechas de disponibilidad utilizando los criterios antes mencionados.

Para cada satélite se tiene una ecuación destinada para el cálculo del NDVI:

- Landsat 7:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 4 (NIR)} - \text{Banda 3 (Red)}}{\text{Banda 4 (NIR)} + \text{Banda 3 (Red)}}$$

- Landsat 8:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 5 (NIR)} - \text{Banda 4 (Red)}}{\text{Banda 5 (NIR)} + \text{Banda 4 (Red)}}$$

Todo el cálculo del NDVI se hizo a través de un Sistema de Información Geográfica denominado **QGIS versión 3.18.1**, se utilizaron únicamente 2 bandas diferentes de cada imagen satelital (Banda Red y Banda NIR), la fecha correspondiente a las descargas son las siguientes: 21 de abril del 2000, 10 de noviembre del 2004, 05 de noviembre del 2008 y 19 de enero de 2013 del satélite Landsat 7, seguido de las fechas 23 de febrero de 2017 y 20 de abril del 2020 del satélite Landsat 8.

Antes de calcular el NDVI para estas fechas, se realizó una mejora de resolución atmosférica, o mejor denominada *Pansharpening* en QGIS, mejorando las bandas para tener un mejor resultado en cuanto a la resolución espectral de todas las imágenes.

Para las fechas 10 de noviembre del 2004, 05 de noviembre del 2008 y 19 de enero de 2013, imágenes del satélite Landsat 7, se realizó un procedimiento extra, ya que el satélite Landsat 7 tuvo un fallo en su Escaner Corrector Lineal (SLC) el 31 de mayo del 2003, el cual produjo que solamente el 70% del satélite tenga un buen rendimiento, a este fallo se le conoce como Bandeamiento y se corrige a través de

una máscara que por defecto se descarga en conjunto al archivo zip que contiene el conjunto de bandas que se obtiene a través de la plataforma glovis, denominada GASP MASK.

Esta corrección se hace a través de una combinación de bandas, combinando cada banda con su respectiva máscara, con ayuda de las herramientas que ofrece nuestro sistema de información geográfica.

Teniendo las bandas limpias y listas para utilizar, se abrió una herramienta dentro del QGIS llamada Calculadora Ráster, siguiendo la fórmula para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada antes mencionadas, para las imágenes de los satélites Landsat 7 y 8.

Por último, se procedió a realizar un corte por cada ejido (área de estudio) o mejor llamada “Nueva Máscara”, configurando los colores de escala mono banda (grises) y Natural breaks con colores diversos, cada mapa está dividido en 4 colores de acuerdo a su cálculo.

Capítulo 3. Determinación de la deforestación a través del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el municipio de Bacalar.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por el cálculo de NDVI y el mapeo del mismo, así como el análisis cartográfico de cada uno de los ejidos que pertenecen a nuestra área de estudio.

3.1. Cálculo del NDVI por ejido para los años 2000, 2004, 2008, 2013, 2017 y 2020.

A continuación, se presentan 2 tipos de mapas por cada ejido del área de estudio, el primero corresponde a una combinación de bandas RGB (4, 3, 2) – Color Natural del año 2020, en el segundo corresponde a 6 mapas en una sola página, en donde se puede ver cómo ha ido cambiando la vegetación.

Figura 1.



Figura 1.1

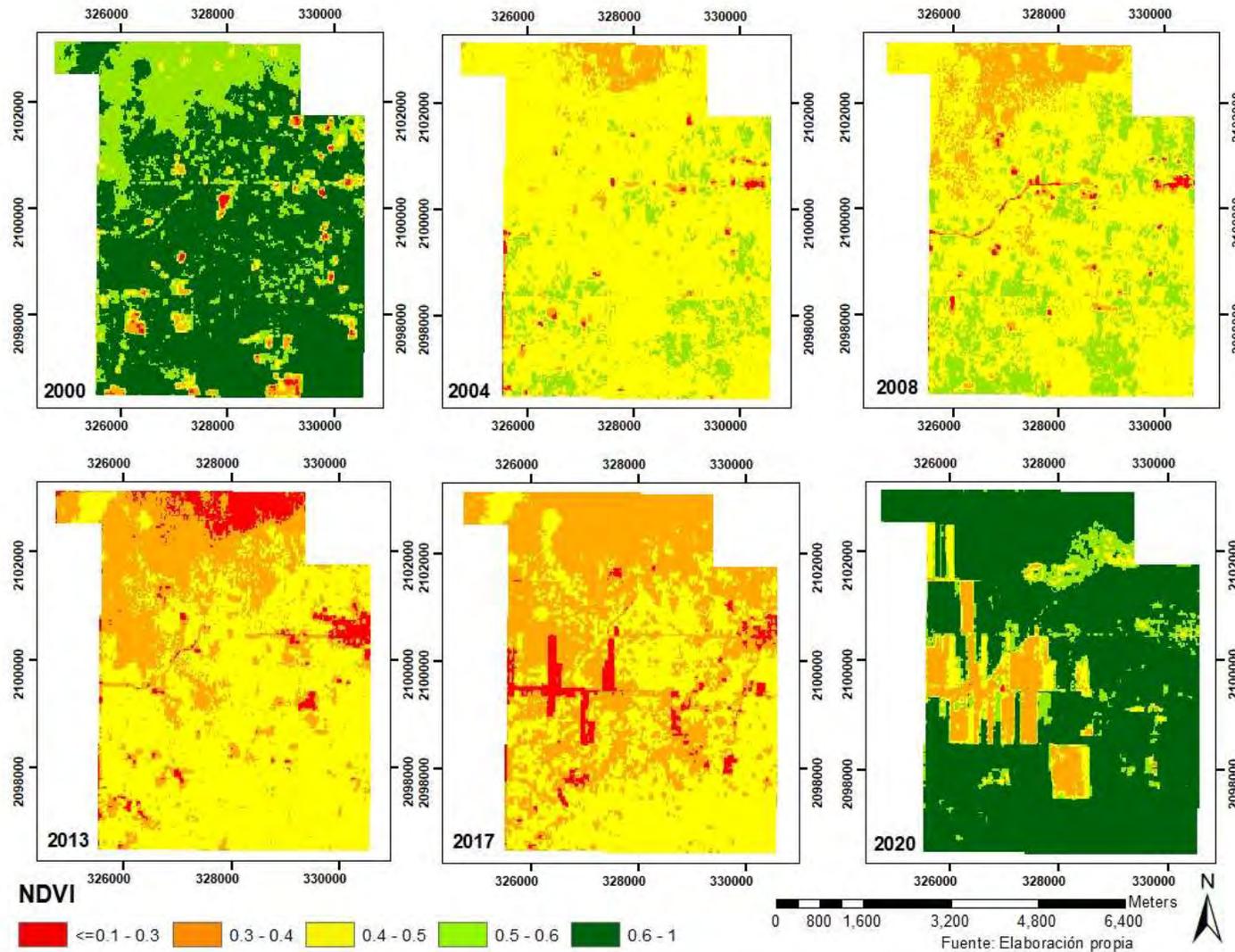


Figura 2.

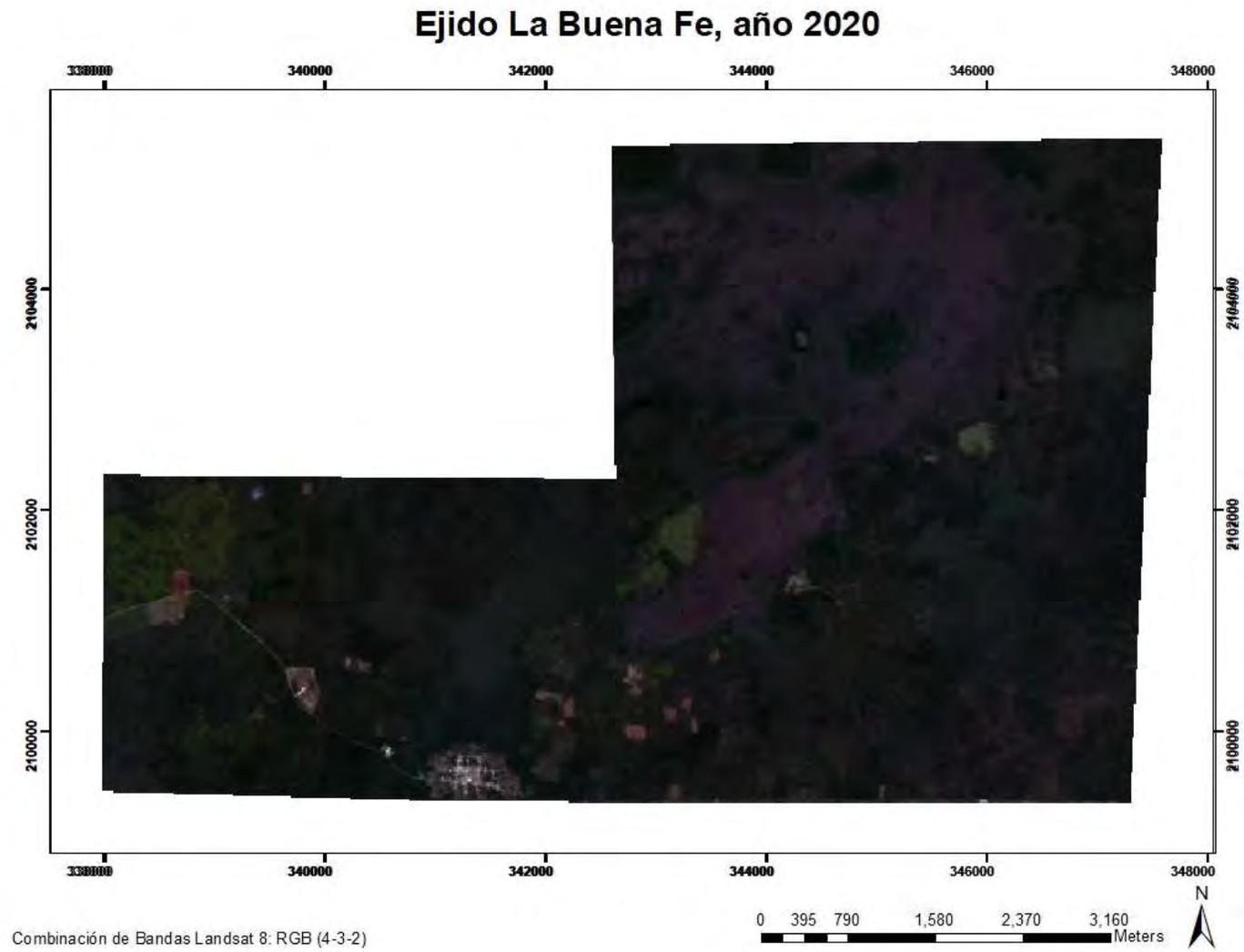


Figura 2.1

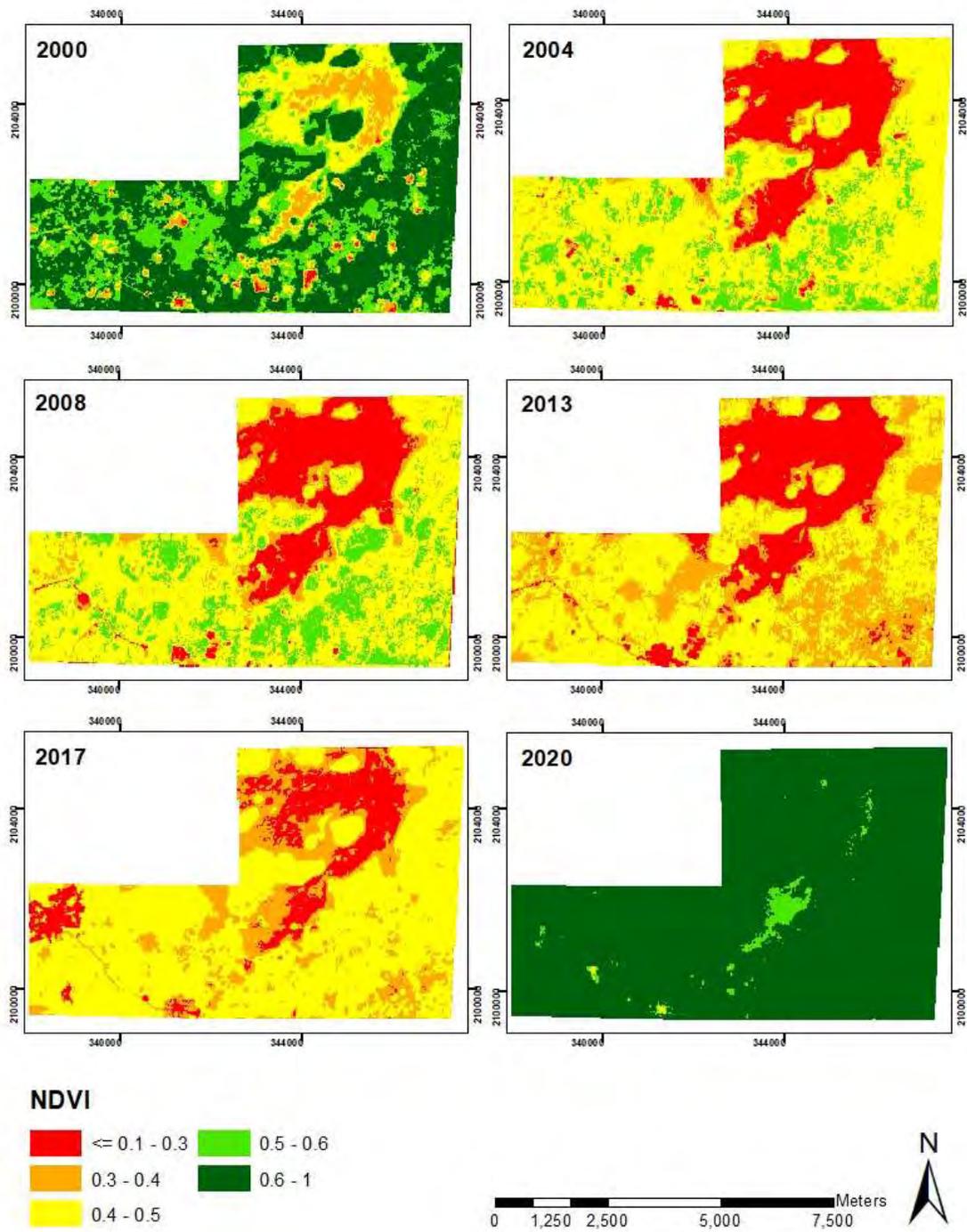


Figura 3.

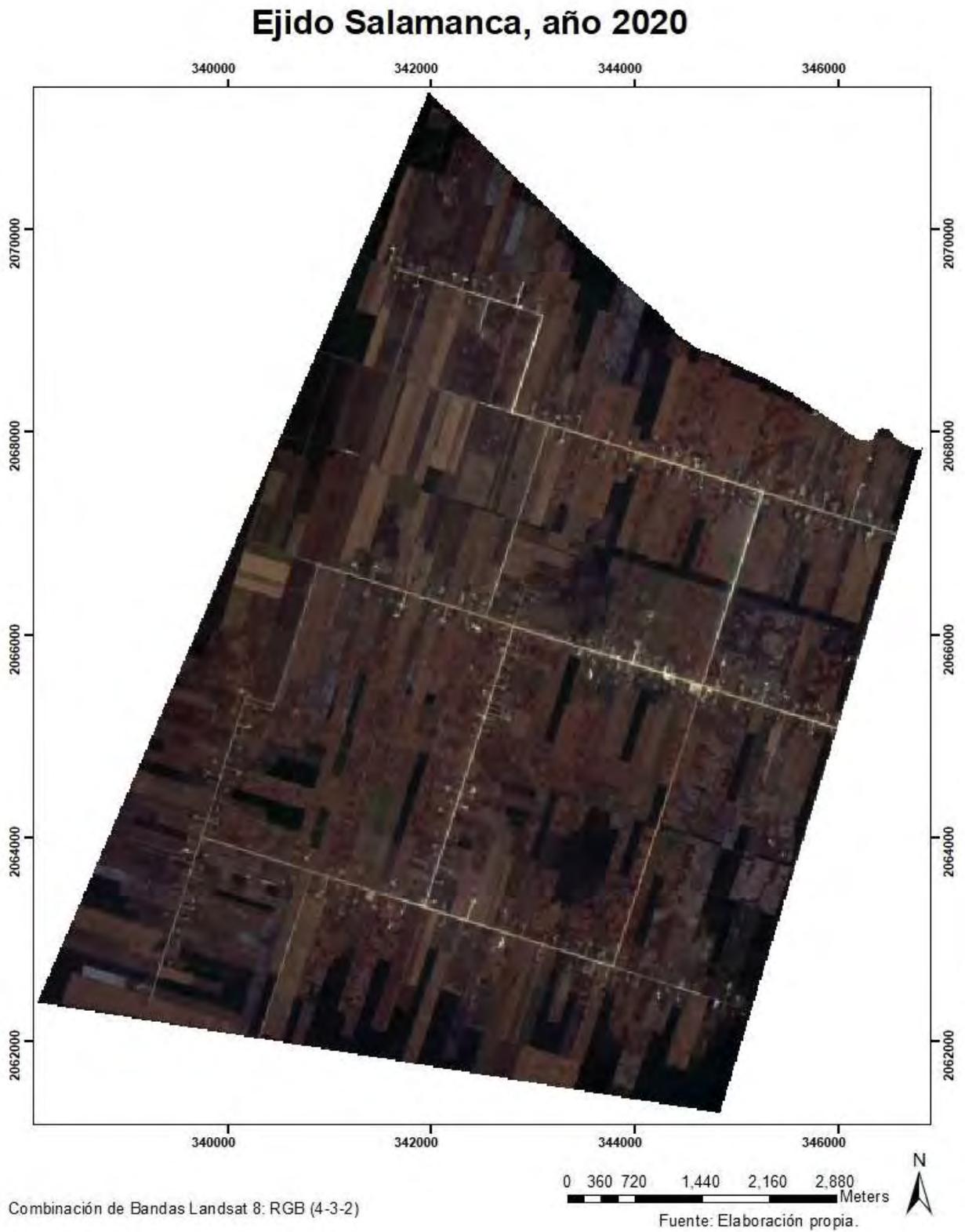


Figura 3.1

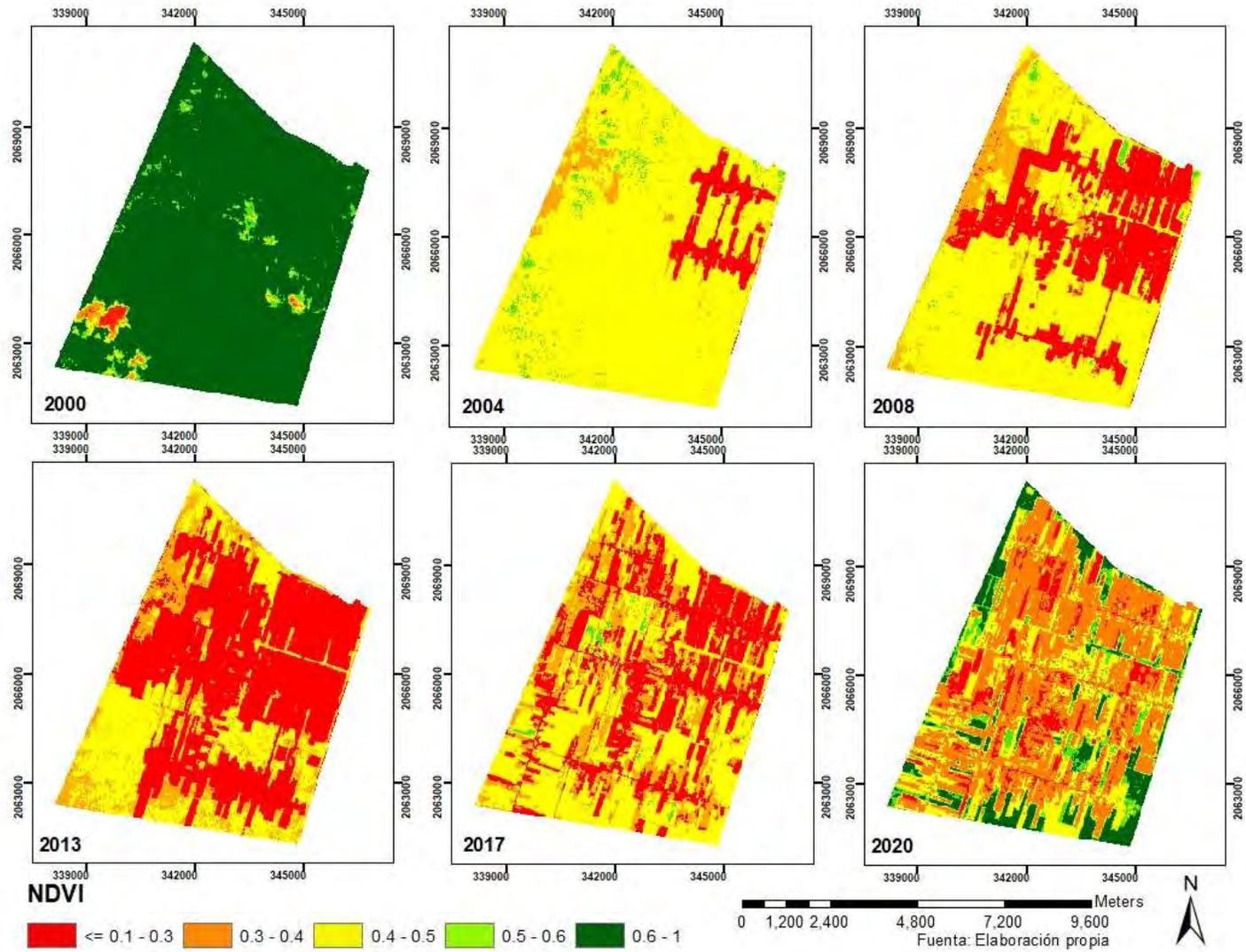


Figura 4.

Ejido El Bajío, año 2020



Figura 4.1

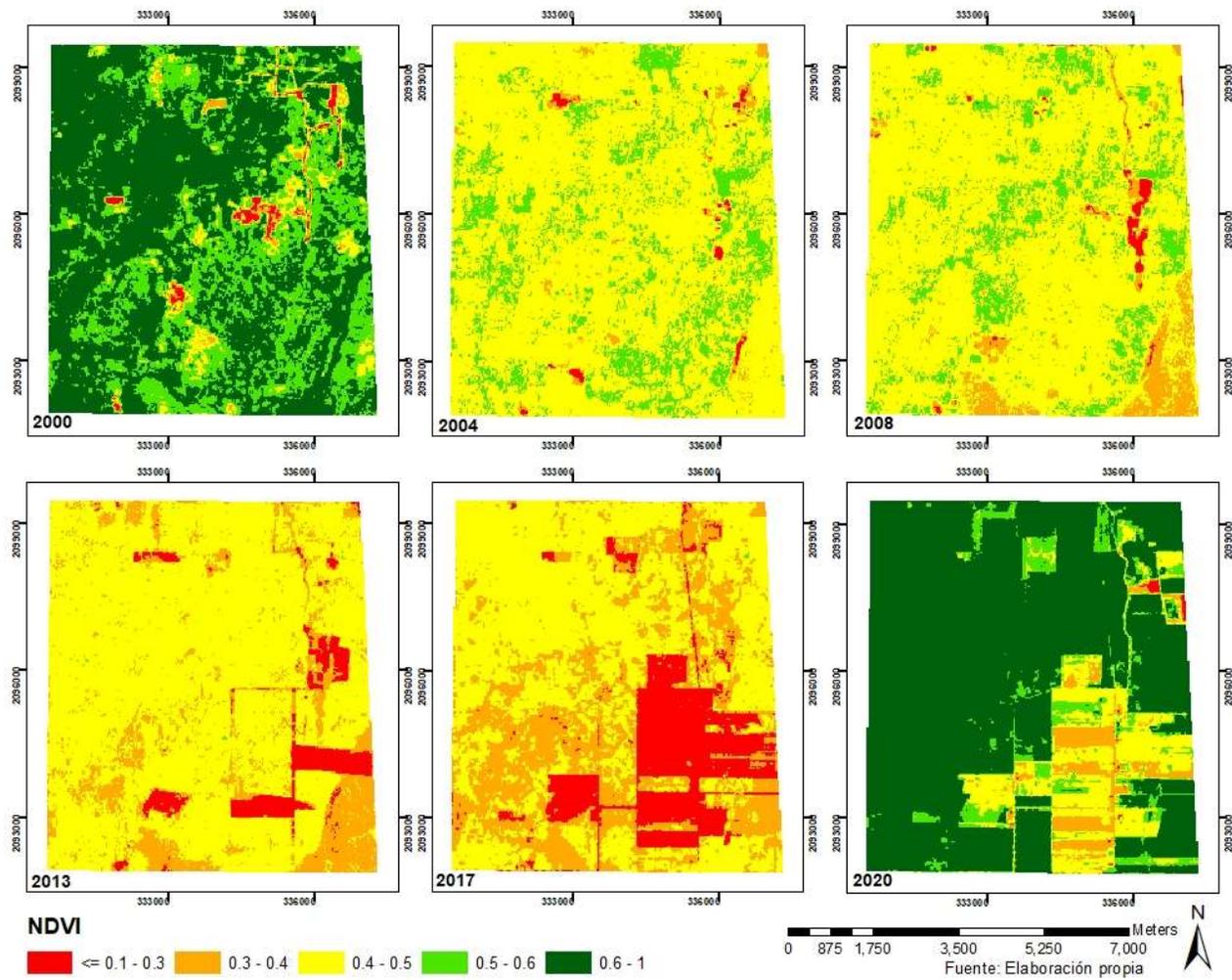


Figura 5.

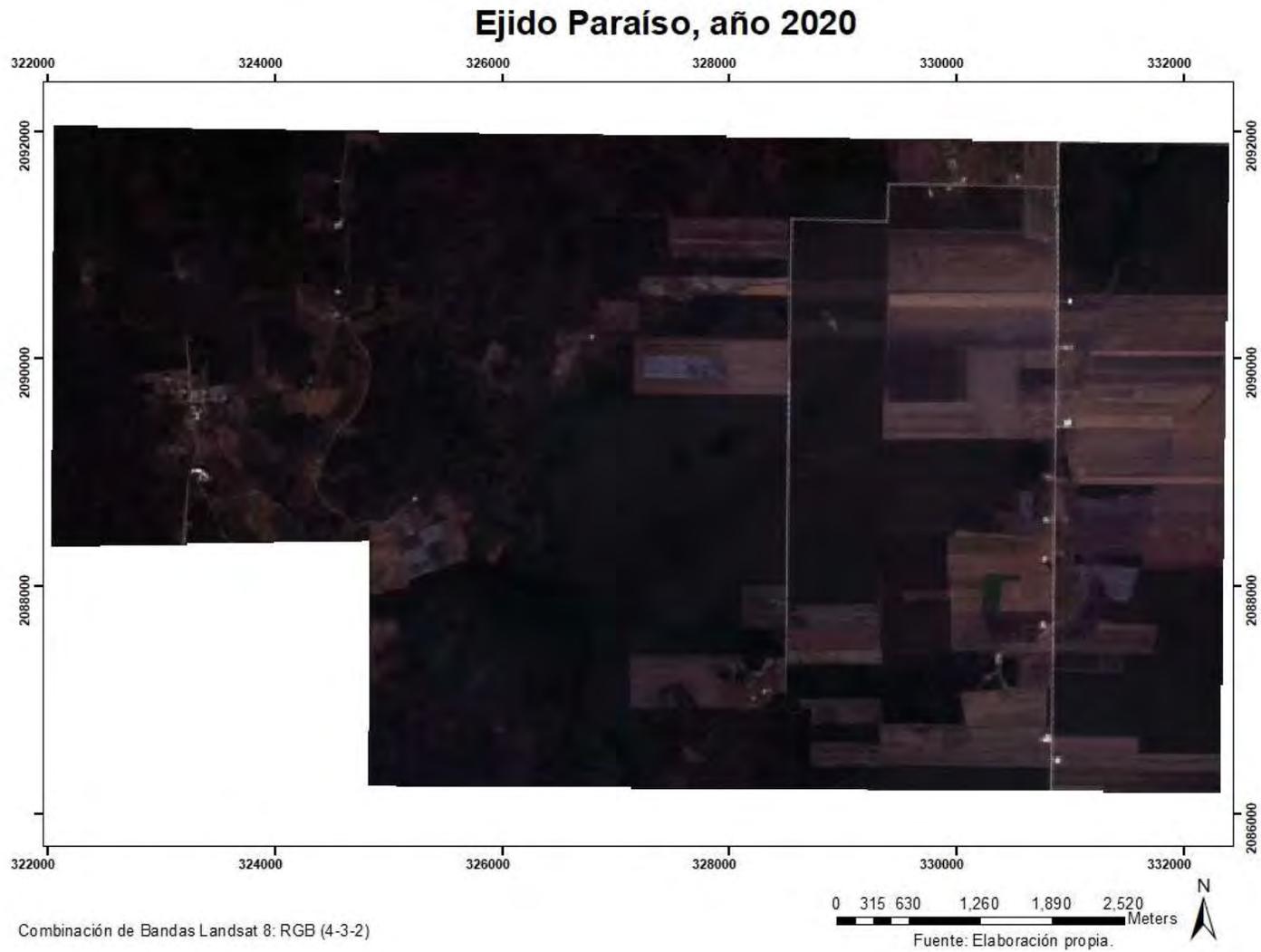


Figura 5.1

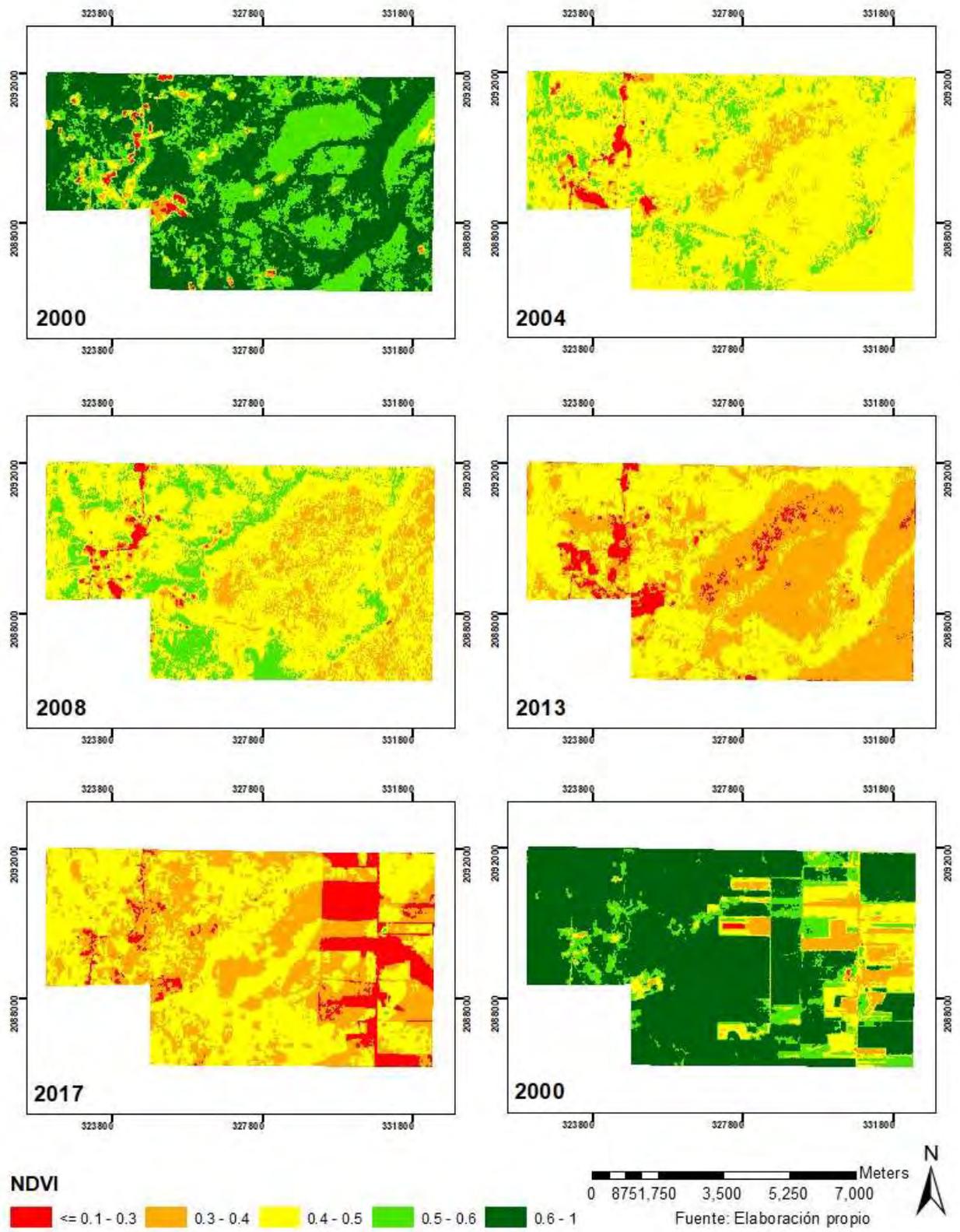


Figura 6.



Figura 6.1

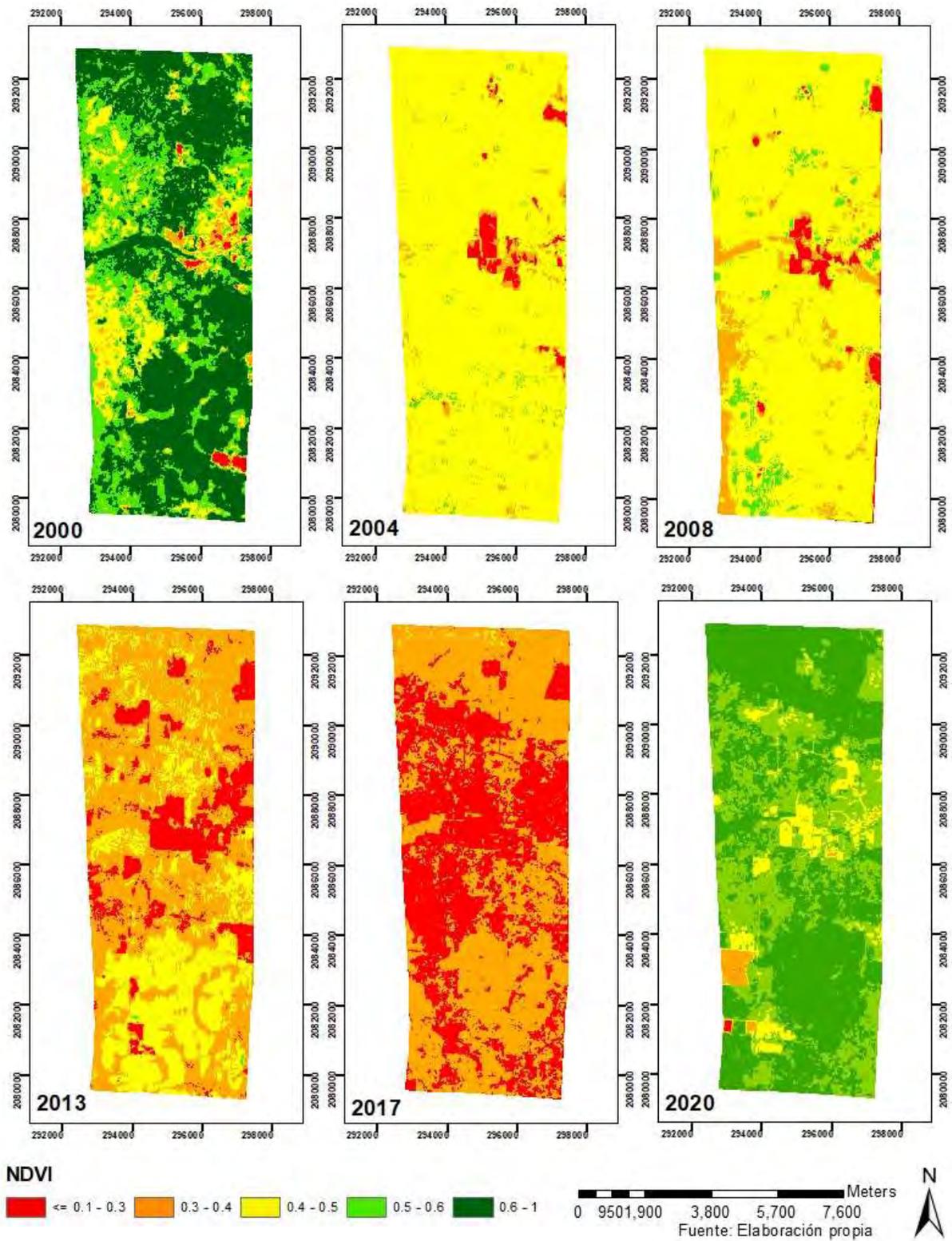


Figura 7.

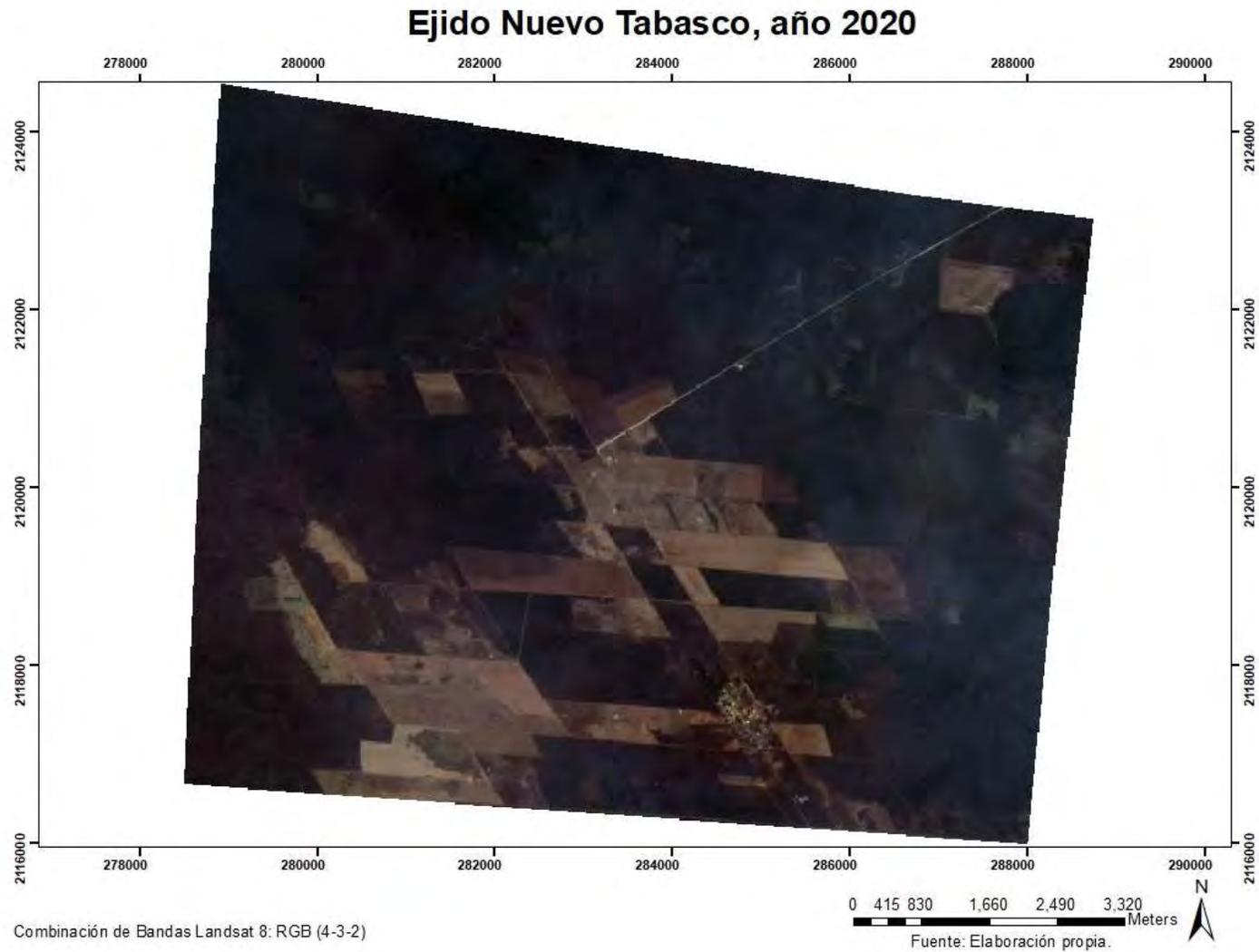


Figura 7.1

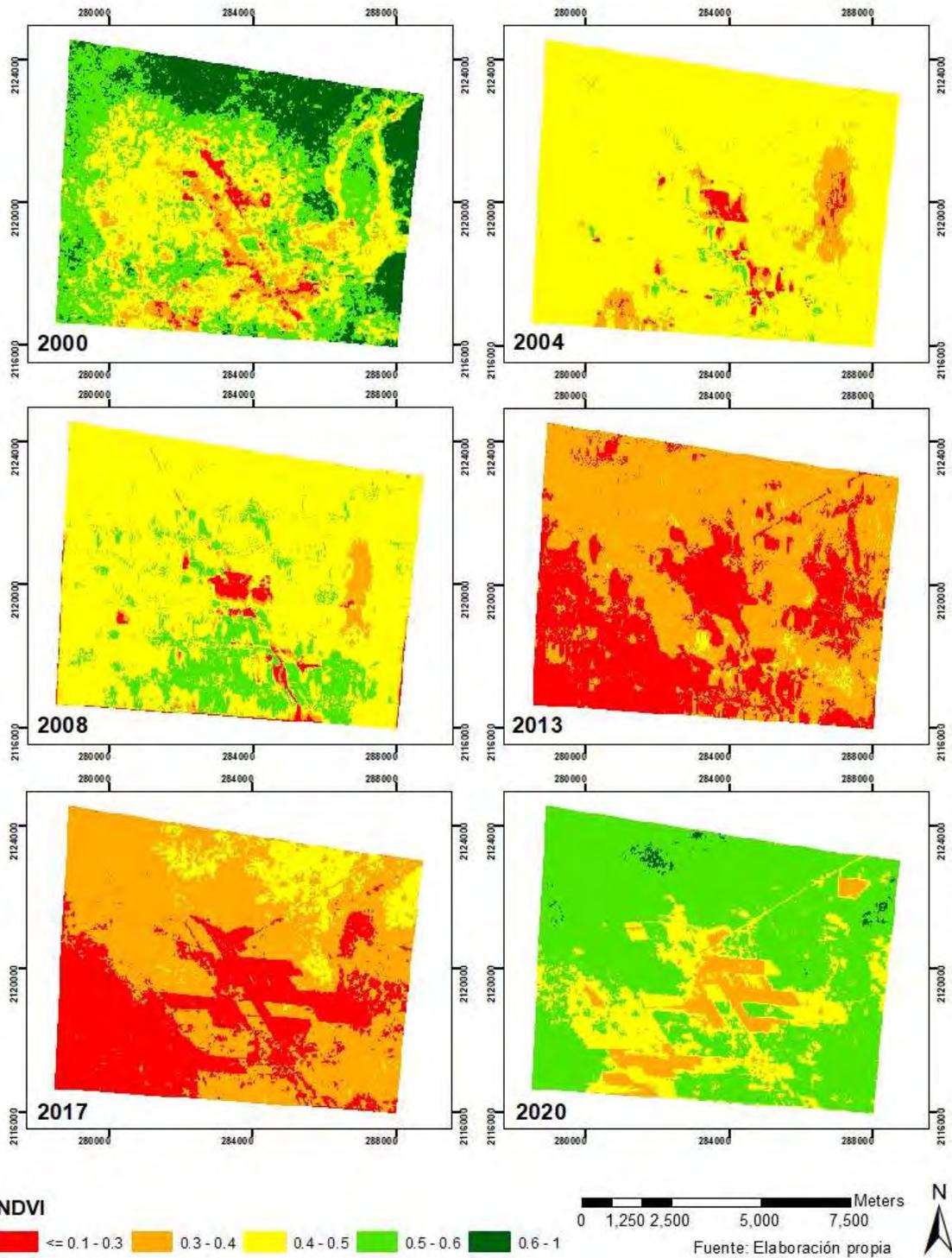


Figura 8.

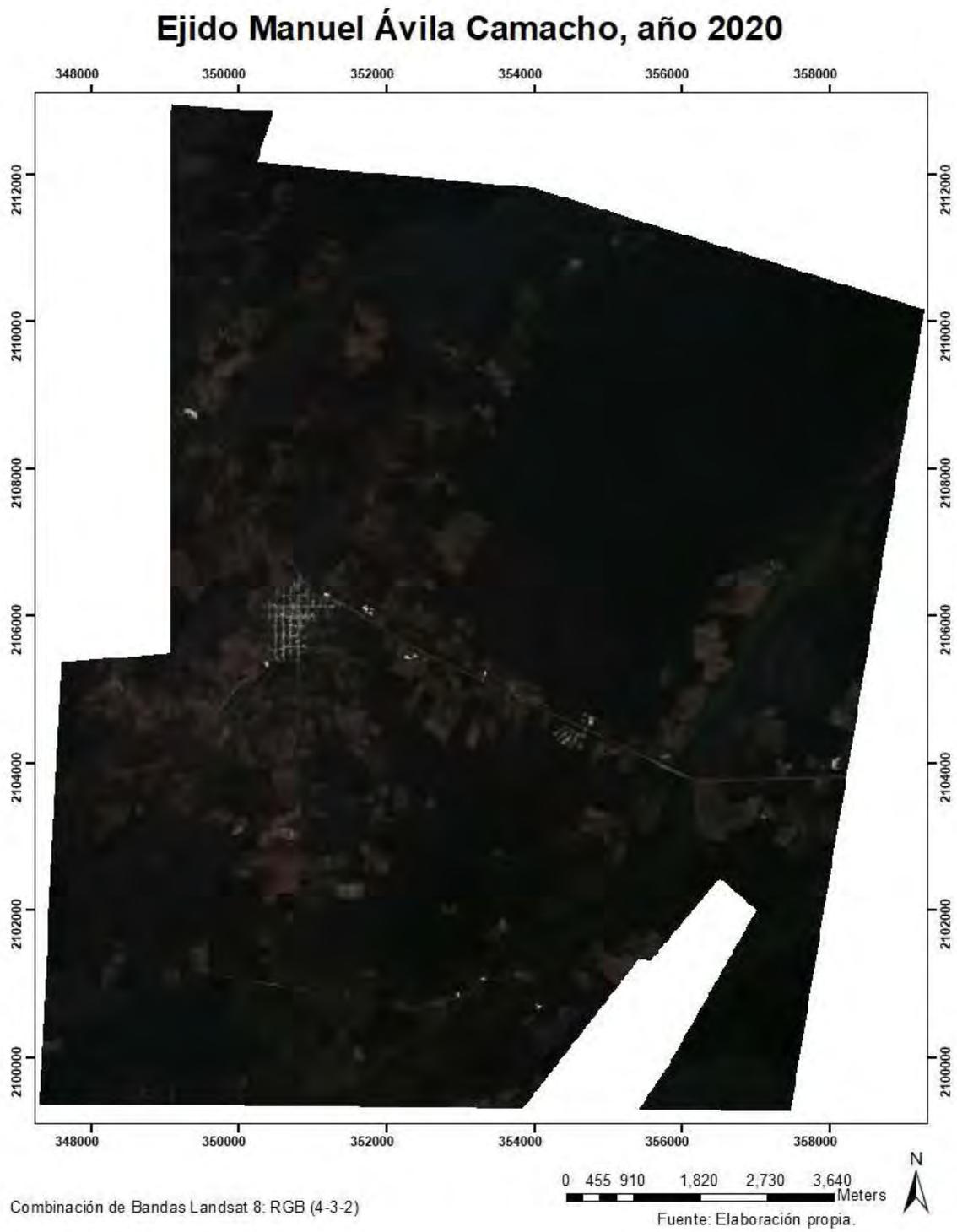
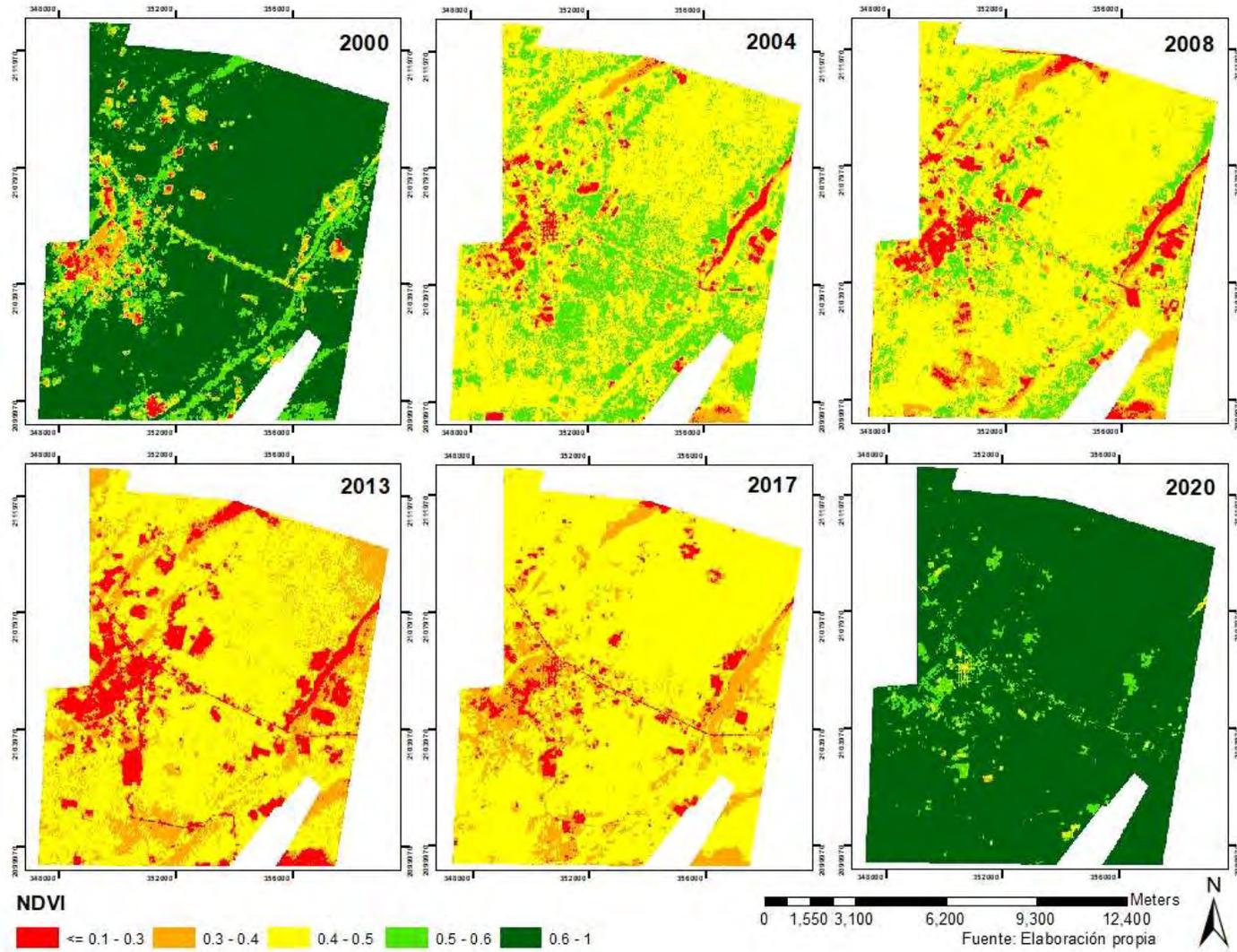


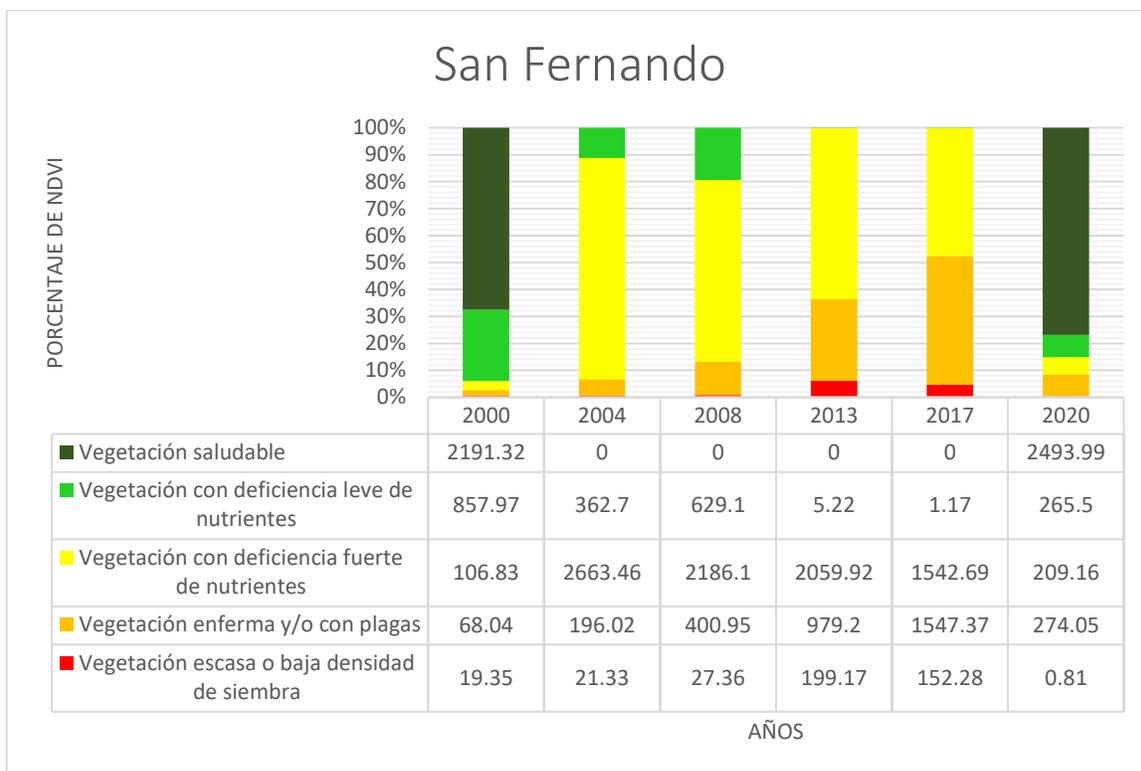
Figura 8.1



3.2. Análisis Cartográfico.

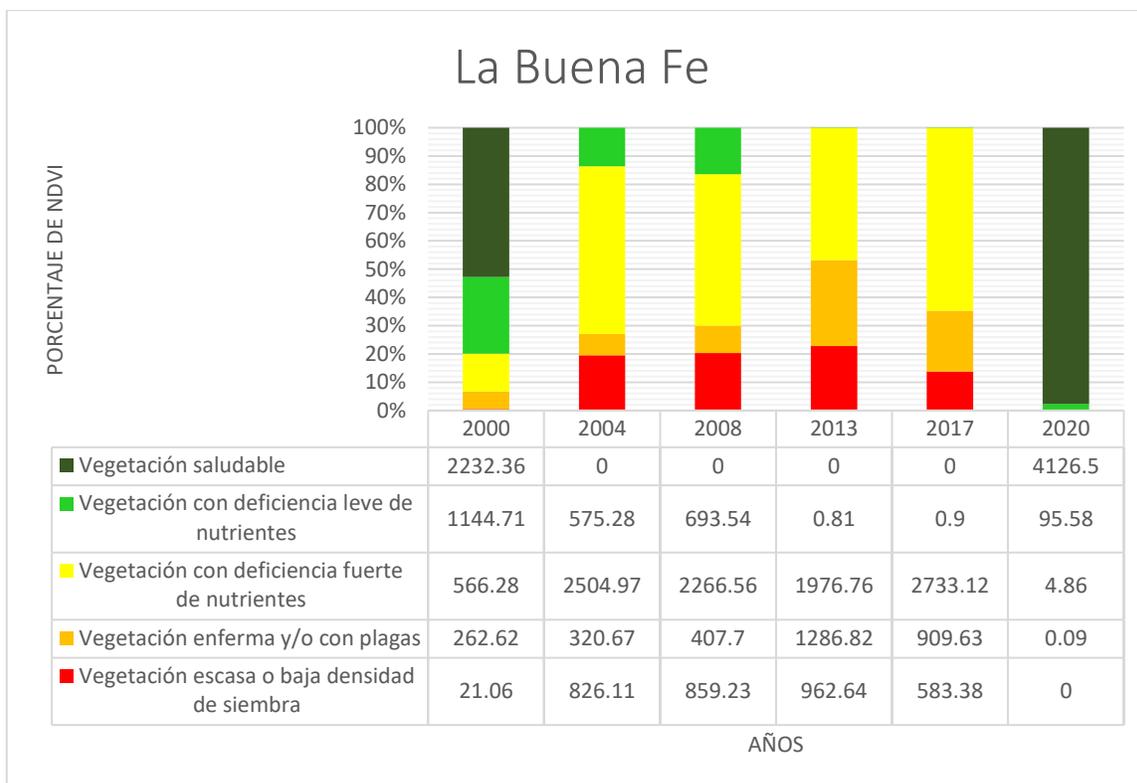
A continuación, se presenta el análisis de los mapas de color natural, así como de las zonas representando los porcentajes de niveles de vegetación correspondientes al cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en una gráfica de barras por cada ejido del área de estudio, las figuras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 representan a los mapas de color natural y todos son del año 2020, en estos, se pueden observar las áreas en donde se encuentran las parcelas de cultivos.

Las figuras 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1 y 8.1 están integradas por 6 mapas del cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), correspondiente a los años 2000, 2004, 2008, 2013, 2017 y 2020, se ha realizado una gráfica por ejido del área de estudio, en donde se comparan todos los resultados obtenidos en los mapas, cada gráfica representa la comparación entre los años en que se calculó el índice, los niveles de vegetación representados son: vegetación escasa o baja densidad de siembra ($\leq 0.1 - 0.3$), vegetación enferma y/o con plagas ($0.3 - 0.4$), vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes ($0.4 - 0.5$), vegetación con deficiencia leve de nutrientes ($0.5 - 0.6$) y vegetación saludable ($0.6 - 1$), en la cuales están representados los porcentajes que corresponden al área territorial en hectáreas del ejido representado.



San Fernando

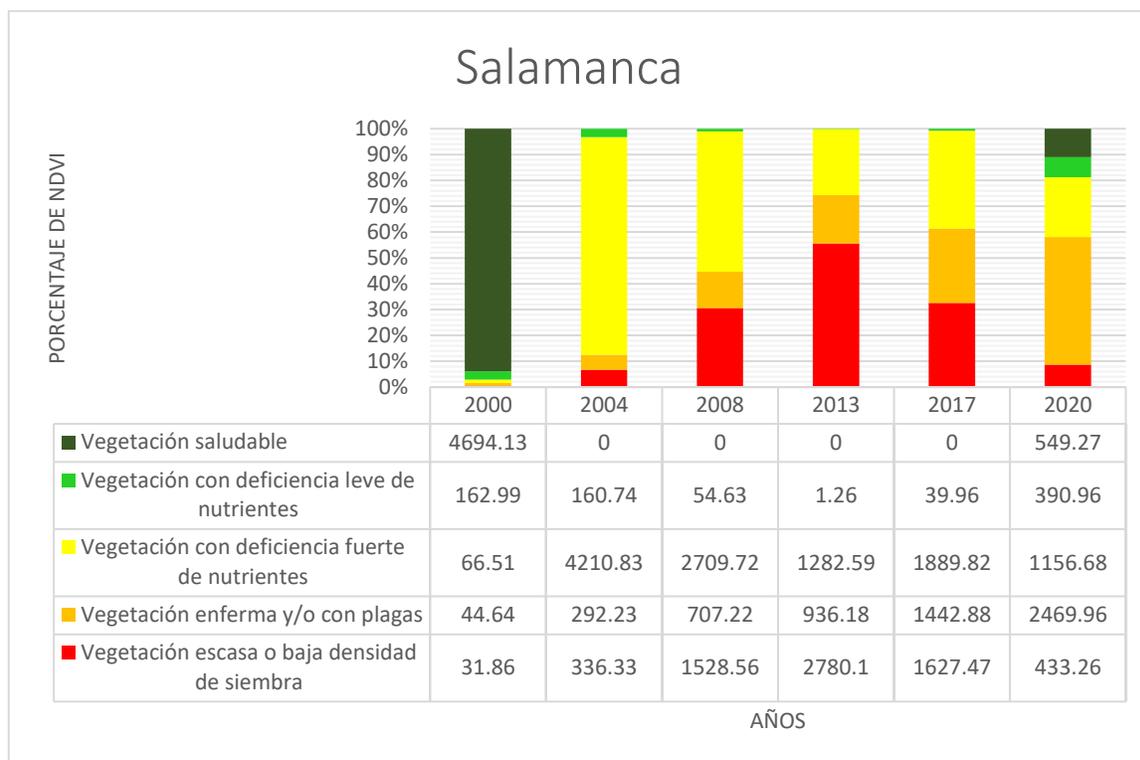
En la figura 1 se pueden observar las parcelas de agricultura y las brechas/caminos en el año 2020, por otra parte, en la gráfica que representa a la figura 1.1, en el año 2000 puede notarse que la vegetación saludable predomina con casi 2,200 hectáreas y la que menos hectáreas representa es la vegetación escasa o baja intensidad de siembra, por otra parte, en el año 2004 la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes abunda con casi 2670 hectáreas y la vegetación saludable es nula durante ese año, así como en este año, en los años 2008, 2013 y 2017 la vegetación saludable es nula y predomina la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes con excepción del año 2017 que igualmente predomina una vegetación enferma y/o con plagas, nuevamente en el año 2020 la vegetación saludable incrementó hasta casi 2,500 hectáreas y la vegetación escasa o baja densidad de siembra es casi nula.



La Buena Fe

En la figura 2, se muestra en el año 2020 cómo están distribuidas algunas parcelas en el ejido La Buena Fe. En la gráfica que representa a la figura 2.1, se puede notar que, en el año 2000, la vegetación saludable predomina en el área de este ejido con más de 2,200 hectáreas y en segundo lugar se encuentra una vegetación con deficiencia leve de nutrientes, el rango de vegetación que es menor que todos los demás es el de la vegetación escasa o baja densidad de siembra. En los años 2004, 2008, 2013 y 2017 la vegetación saludable es nula por completo, en los mismos años la vegetación que predomina es la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes, a excepción en el año 2013 que los rangos que predominan son 2, los de vegetación enferma y/o plagas con aproximadamente 1,980 hectáreas y vegetación escasa o baja densidad de siembra con aproximadamente 1,290 hectáreas. Y en el año 2020 la vegetación saludable es la que predomina casi completamente en el ejido con casi 4,130 hectáreas, por otra parte, la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes y vegetación enferma y/o con plagas son

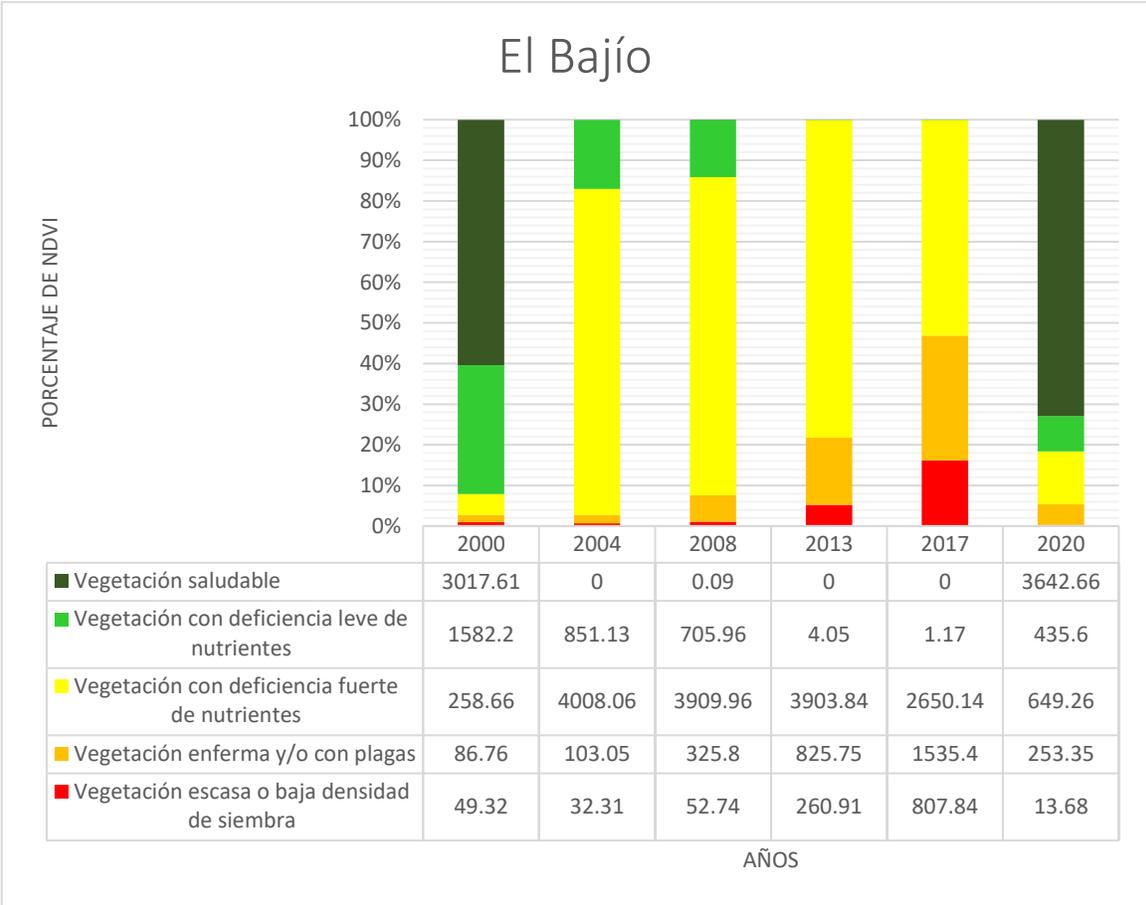
mínimas las hectáreas que pertenecen a esos rangos y la vegetación escasa o baja densidad de siembra, es totalmente nula.



Salamanca

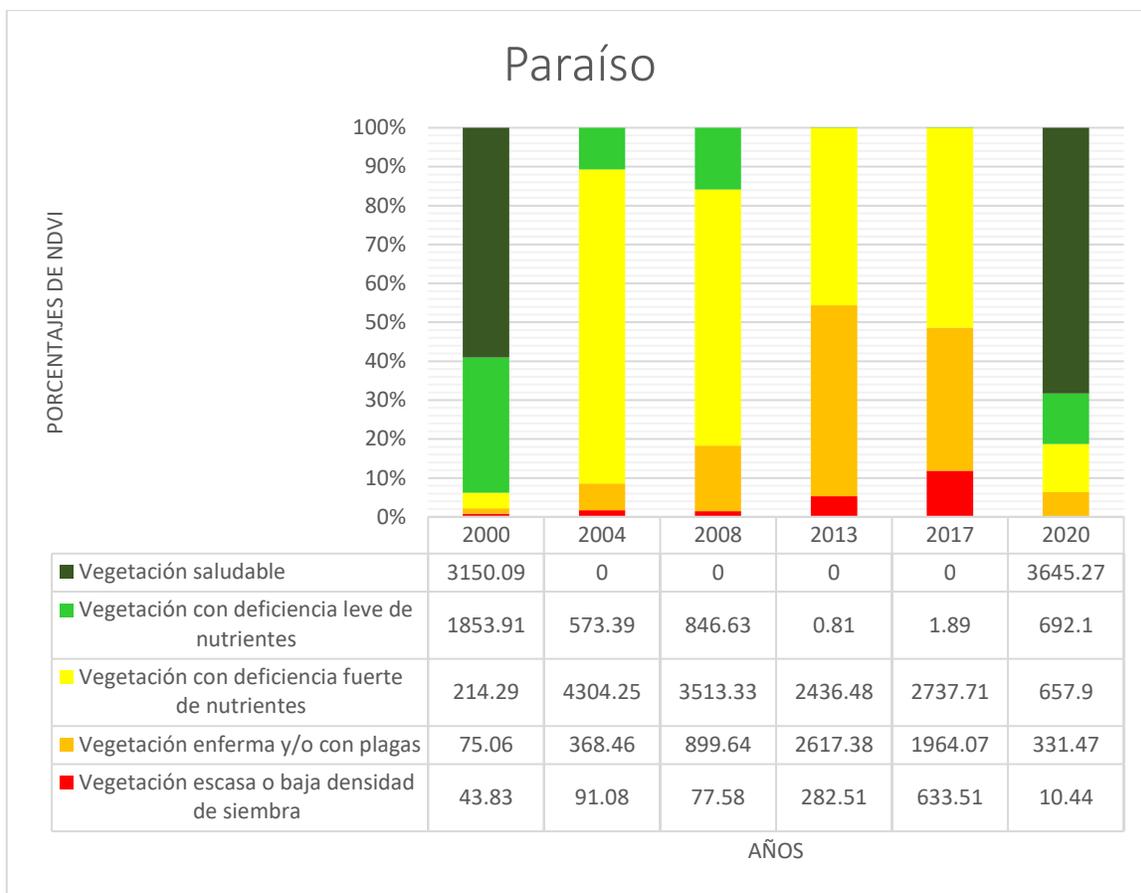
En la figura 3, puede notarse una gran cantidad de parcelas, las cuales están casi sobre toda la superficie del ejido Salamanca en el año 2020. Por otra parte en la figura 3.1 según la gráfica, en el año 2000, casi toda el área de este ejido correspondía a una vegetación saludable de casi 4,700 hectáreas, como se mencionó anteriormente, en los años 2004, 2008, 2013 y 2017, la vegetación saludable es completamente nula, en el año 2004 la presencia de vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes abunda en el ejido con aproximadamente 4,210 hectáreas, en el año 2008, en primer lugar con casi 2,700 hectáreas predomina la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes y en segundo lugar está la vegetación escasa o baja densidad de siembra con poco más de 1,520 hectáreas, en el año 2013 y 2017 predominan los últimos 3 niveles de una mala salud vegetal (con deficiencia fuerte de nutrientes, enferma y/o plagas y escasa o con baja densidad de siembra), y en el año 2020, los niveles más altos en cuanto a hectáreas

son los vegetación enferma y/o plagas con caso 2,470 hectáreas y vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes con un aproximado de 1,160 hectáreas.



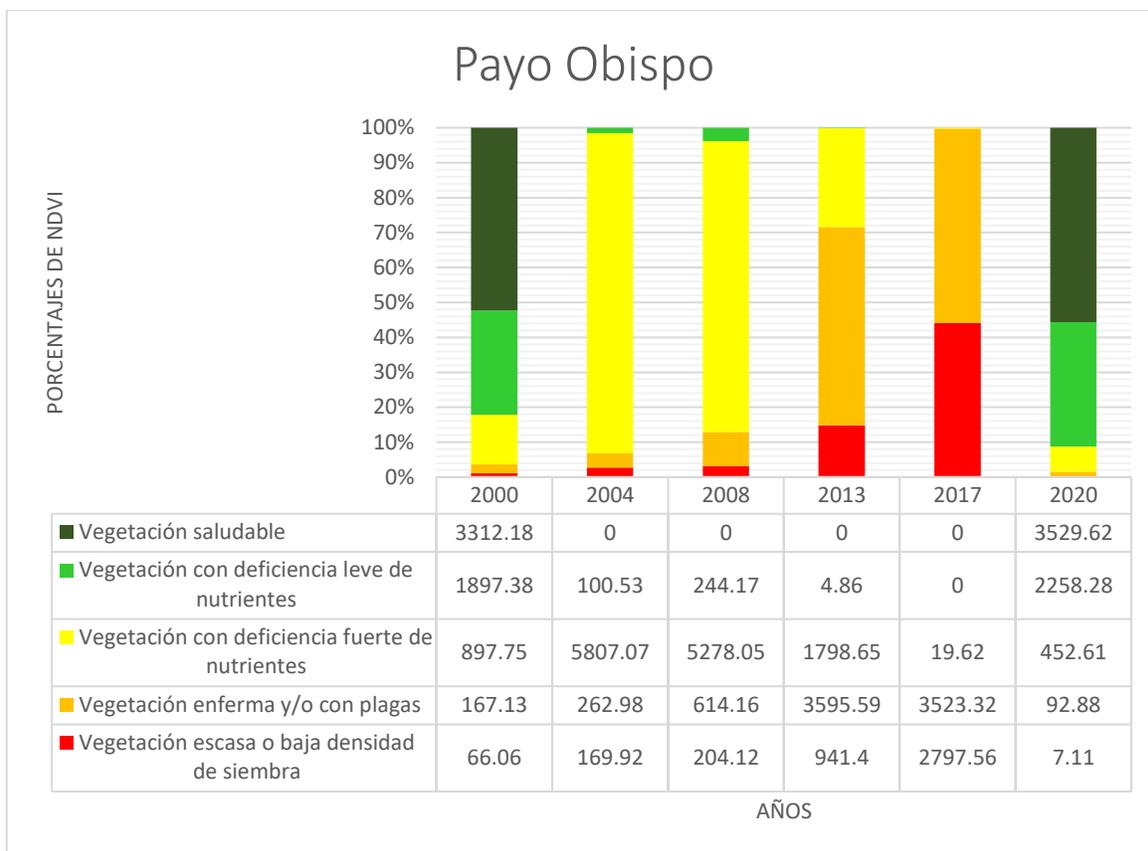
El Bajío

En la figura 4 se pueden observar cómo las parcelas ocupan un buen espacio de la superficie total del ejido en el año 2020, en la gráfica que representa a la figura 4.1, en el año 2000 y 2020 la vegetación saludable es la que predomina en casi todo el ejido, en los años 2004, 2013 y 2017 la vegetación saludable es completamente nula, en el año 2008 es casi nula con menos de media hectárea. En los años 2004, 2008, 2013 y 2017, se tiene como dominante la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes.



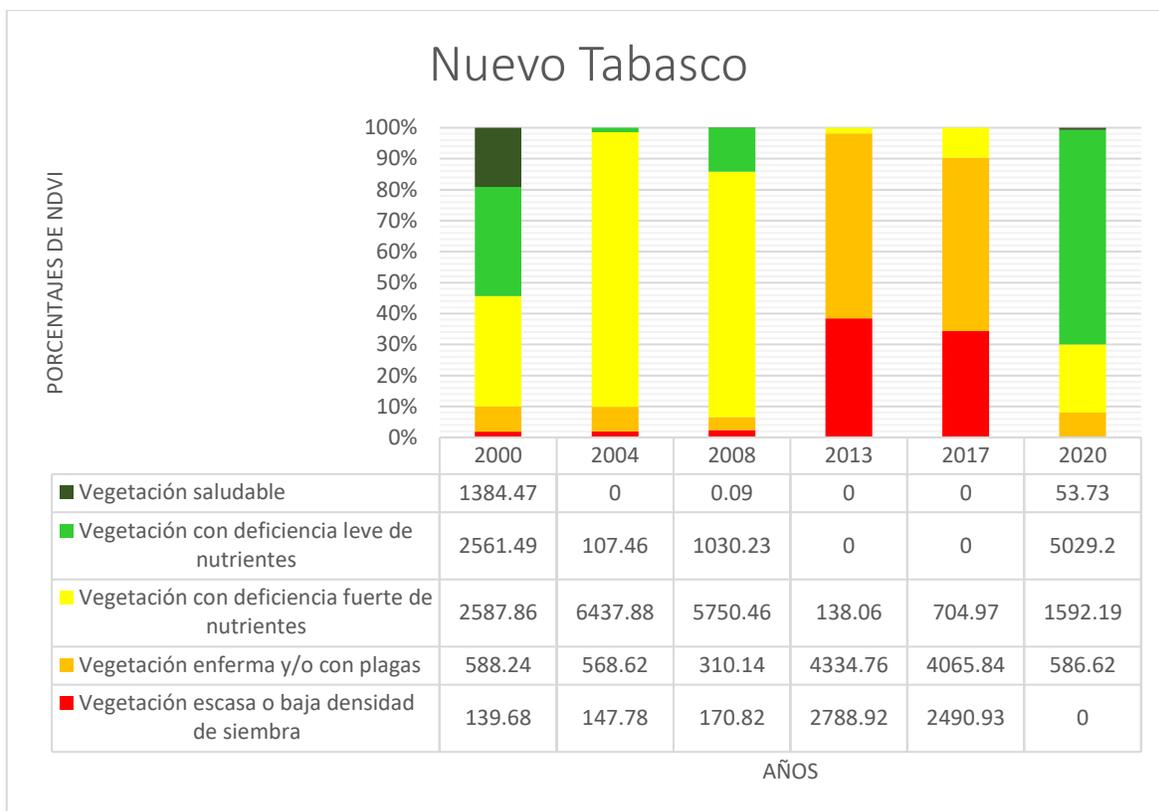
Paraíso

En la figura 5, se pueden ver las parcelas presentadas y una parte en donde se encuentra la comunidad que habitaba este ejido en el año 2020. En la gráfica que representa a la figura 5.1, se puede ver que en los años 2000 y 2020 hubo una vegetación saludable en poco más de la mitad del área total del ejido, y en los años 2004 y 2008 la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes en más de la mitad del área total, por otra parte, en los años 2013 y 2017, la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes y la vegetación enferma y/o con plagas, dominan casi toda el área del ejido con más de 2,000 hectáreas del área total. Cabe mencionar que, así como en la mayoría de los ejidos mencionados, en los años 2004, 2008, 2013 y 2017, la presencia de una vegetación saludables no existe.



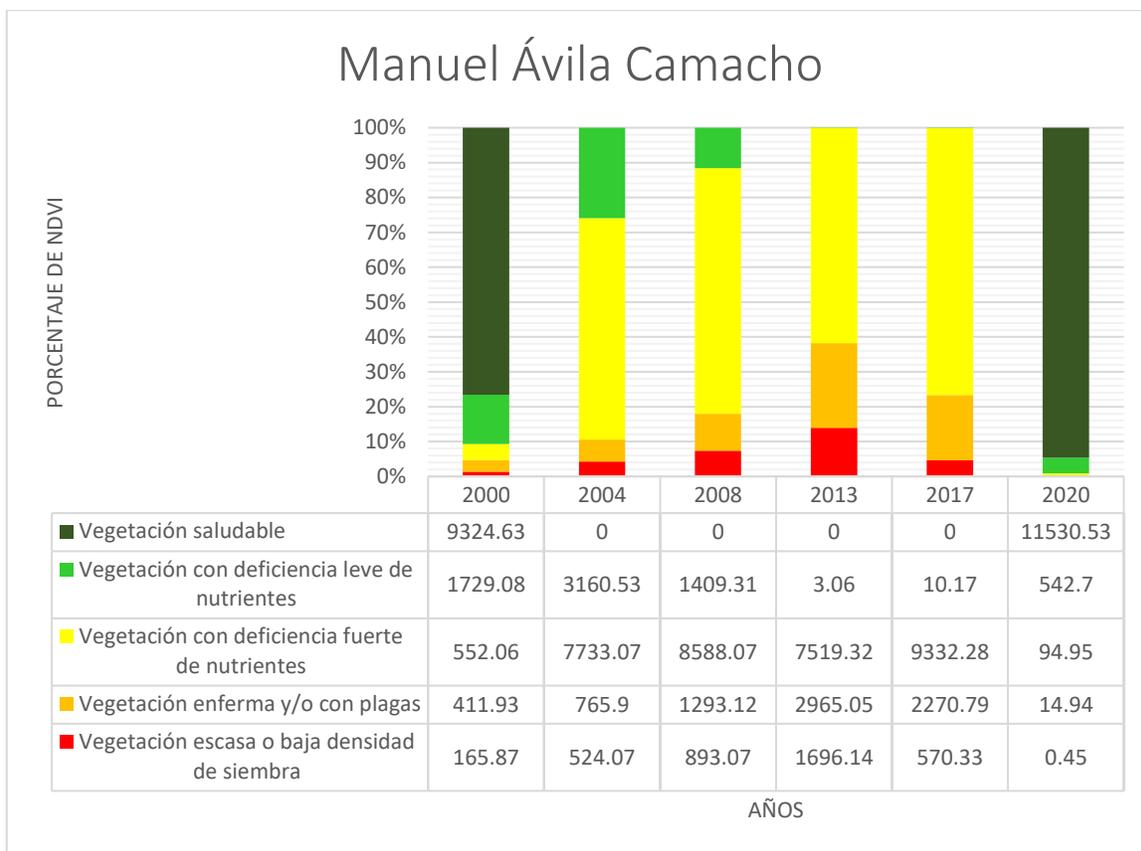
Payo Obispo

En la figura 6, como en todas las demás figuras, podemos ver la presencia de parcelas dispersas en el área del ejido. En la gráfica que representa a la figura 6.1 del ejido Payo Obispo, se puede ver que, en los años 2000 y 2020, la vegetación saludable y la vegetación con deficiencia leve de nutrientes es la más abundante durante esos años y en los años 2004, 2008, 2013 y 2017 la vegetación saludable es nula y en el 2017, de igual forma la vegetación con deficiencia leve de nutrientes es nula. En los años 2004 y 2008 los valores de vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes son los que predominan con más de 5,000 hectáreas del área total del ejido, y en los años 2013 y 2017 los valores más altos en cuanto a hectáreas pertenecen a la vegetación enferma y/o con plagas.



Nuevo Tabasco

En la figura 7, se hacen notar las parcelas de suelo desnudo en el año 2020. En la gráfica que representa la cantidad de hectáreas en porcentaje que los valores del año 2000 varían entre el segundo y tercer rango de salud vegetal (vegetación saludable, con deficiencia leve de nutrientes y deficiencia fuerte de nutrientes) con un poco más de 2,500 hectáreas, en el año 2004 el valor más alto corresponde a una vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes con aproximadamente 5,750 hectáreas. En los años 2013 y 2017 la vegetación saludable y la vegetación con deficiencia leve de nutrientes es completamente nula en ambas, pero domina con más de 4,000 y en segundo lugar queda como dominante la vegetación escasa o baja densidad de siembra con más de 2,300 hectáreas. En el año 2020 no existe ninguna hectárea de vegetación escasa o baja densidad de siembra.



Manuel Ávila Camacho

En la figura 8, se pueden notar muy dispersas las parcelas en casi todo el ejido. En la gráfica que corresponde a la figura 8.1, se puede ver que los años con una vegetación saludable considerable es en los años 2000 y 2020, de lo contrario en los años 2004, 2008, 2013 y 2017, esta vegetación saludable es inexistente, en el año 2004 la vegetación con mayor afluencia es la de una vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes con casi 3,200 hectáreas. Para el año 2008, la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes es la que corresponde a más de 8,500 hectáreas y más de 1,200 hectáreas pertenecen a una vegetación con deficiencia leve de nutrientes y a la vegetación enferma y/o con plagas, en el año 2013 la vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes es la que predomina en el ejido con más de 7,000 hectáreas y en segundo lugar con más de 2,000 hectáreas está la vegetación enferma.

Comparación de los rangos de salud vegetal, del año 2000 al año 2020.

Con base a los resultados obtenidos del cálculo y mapeo del NDVI del área de estudio presentada a lo largo de este trabajo, para poder saber los porcentajes de aumento y disminución en cuanto a la salud vegetal, del año 2000 al año 2020, se realizó la siguiente tabla.

Tabla 5 Comparación de la salud vegetal del año 2000 al año 2020 por ejido; Fuente: elaboración propia.

Ejido/Vegetación	Saludable	Deficiencia leve de nutrientes	Deficiencia fuerte de nutrientes	Enfermedad y/o con plagas	Escasa o baja densidad de siembra
San Fernando	↑ 9.3%	↓ 18.27%	↑ 3.1%	↑ 6.3%	↓ 0.58%
La Buena Fe	↑ 44.82%	↓ 24.84%	↓ 13.3%	↓ 6.1%	↓ 0.5%
Salamanca	↓ 82.11%	↑ 4.54%	↑ 21.83%	↑ 48.5%	↑ 8.1%
El Bajío	↓ 12.5%	↓ 22.8%	↑ 7.8%	↑ 3.37%	↓ 0.7%
Paraíso	↑ 9.3%	↓ 21.73%	↑ 8.3%	↑ 4.8%	↓ 0.6%
Payo Obispo	↑ 3.46%	↑ 5.7%	↓ 7.02%	↓ 1.1%	↓ 0.94%
Nuevo Tabasco	↓ 18.32%	↑ 33.95%	↓ 13.7%	↓ 0.02%	↓ 1.9%
Manuel Ávila Camacho	↑ 18.13	↓ 9.75%	↓ 3.73%	↓ 3.26%	↓ 1.36%

Se puede ver que en los ejidos San Fernando, La Buena Fe, Paraíso, Payo Obispo y Manuel Ávila Camacho, la vegetación saludable aumento en cuanto a su porcentaje total del área, el ejido que tuvo un incremento mayor de vegetación saludable (color verde fuerte) fue el ejido de La Buena Fe; en los ejidos Salamanca, El Bajío, y Nuevo Tabasco, su vegetación saludable disminuyó a lo largo del período, siendo la disminución más alta la del ejido Salamanca, con un 82% total del área.

En contexto de la vegetación con deficiencia leve de nutrientes (color verde), el ejido que tuvo un mayor aumento de este contemplando el área total, fue Nuevo Tabasco, con un aumento del 33.95% y el ejido que disminuyó fue La Buena Fe con un decremento del 24.84% del área total.

La vegetación con deficiencia fuerte de nutrientes (color amarillo) tuvo un aumento en los ejidos de San Fernando, Salamanca, El Bajío y Paraíso, y una disminución del mismo en los ejidos La Buena Fe, Payo Obispo, Nuevo Tabasco y Manuel Ávila Camacho. El ejido Salamanca es el que tuvo un mayor incremento de deficiencia fuerte de nutrientes en la vegetación total de su área y el que más disminuyó fue Nuevo Tabasco.

Las enfermedades y/o plagas en la vegetación de los ejidos, aumentó en San Fernando, Salamanca, El Bajío y Paraíso, por otra parte, esta misma disminuyó en La Buena Fe, Payo Obispo, Nuevo Tabasco y Manuel Ávila Camacho.

En cuanto a la escasez o la baja densidad de siembra, disminuyó en 7 de los ejidos y solamente aumento en uno, siendo este Salamanca, con un total de 8.1% del área.

En cada ejido se tuvo un buen año con una vegetación saludable y un peor año, en el que la vegetación saludable era casi nula o completamente nula.

Capítulo 4. Discusión y conclusiones.

4.1. Discusión

Transcurridos 20 años, el municipio de Bacalar se ha ido desarrollando en cuanto a varios de sus sectores económicos, como lo son, el sector turístico, el sector agrícola, sector forestal y otros sectores; destacando el tema de la agricultura en Bacalar, se ha hecho presente la agricultura intensiva en la mayoría de los ejidos de nuestra área de estudio.

Este tipo de agricultura, es la práctica que más ha ido dañando el suelo Bacalareño a lo largo de los años, empobreciendo las condiciones del suelo por el uso excesivo de agroquímicos, siendo estos, uno de los principales problemas ambientales, afectando la biodiversidad y contribuyendo a la pérdida de la misma; otro factor principal de alteración al ambiente, es el de la deforestación masiva de áreas forestales, la remoción de los árboles impacta y degrada de manera negativa a nuestro ambiente, la erosión del suelo es la principal afectación que se tiene al remover la cobertura vegetal, así pues, al no tenerse una cantidad necesaria de vegetación, la calidad del aire es afectada (EOS, 2021).

Por otra parte, la salud humana, se vuelve más susceptible a enfermedades de un riesgo muy alto como lo es el cáncer y otros defectos que se pueden tener en niños y/o fetos, debido a todos los plaguicidas que se utilizan en este tipo de agricultura. El uso de transgénicos que se manejan en las parcelas de siembra, ubicadas en los ejidos, afectan tanto a la salud humana como a la salud animal, debido a la cantidad de hormonas que estas presentan, pueden existir posibles intoxicaciones debido a alergias o intolerancia a los alimentos (EOS, 2021).

De acuerdo con García, G. (2005), con la utilización de imágenes del satélite Landsat ETM contribuyó a la detección del cambio de uso de suelo en 3 ejidos cercanos a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo; en el presente trabajo, igualmente se utilizaron imágenes del mismo satélite (Landsat) para determinar el cambio en la vegetación por cambio de uso de suelo.

Citando a Argón, et al. (2013), se utilizó el mismo índice de vegetación denominado NDVI, para la detección cambios en la superficie como lo es la pérdida de vegetación en los ejidos de nuestra área de estudio.

Como se presentó en los resultados obtenidos, la salud vegetal en los ejidos, en el transcurso del año 2000 al año 2020, tuvo muchas altas y bajas en cuanto a lo saludable o escasa vegetación que se encontraba su área, de acuerdo con datos del diario oficial de la federación, se hicieron declaratorias de emergencia en las que se presentaron diversos fenómenos, los cuales pudieron contribuir a la salud de la vegetación.

En especial, el ejido Salamanca presentó un cambio muy notorio en cuanto al crecimiento de nuevas parcelas de siembra, de acuerdo con un habitante de este ejido, mencionó haberse trasladado desde la comunidad menonita que habita en el Estado de Chihuahua hasta Salamanca, que inició el crecimiento del mismo con la comunidad menonita aproximadamente en el año 2004, en la entrevista informal, el habitante mencionaba que al llegar a las tierras de este ejido, la vegetación estaba casi intacta o no desmontada como se encuentra hoy en día, haciendo resaltar la agricultura intensiva y la ganadería.

Los fenómenos naturales presentados durante ese lapso de tiempo fueron, huracanes, tormentas tropicales, lluvias extremas, inundaciones, sequías e incendios (SEGOB, 2008), en el año 2019, en el Estado de Quintana Roo, se dio una alerta por sequía en todo el Estado, lo cual puede verse reflejado en los ejidos en el año 2020, en donde el área vegetal se ha ido recuperando poco a poco.

Uno de los fenómenos naturales al que más es susceptible el Estado de Quintana Roo, es el de los huracanes, por lo que, algunas de las transformaciones en la vegetación del área, pueden ser atribuidas también al impacto de estos fenómenos; de acuerdo con Hernández, Carreño y Castillo (2018), Quintana Roo, ha sido afectado por diversos huracanes entre los más recordados son: Mitch, 1998, cuya amenaza duro 15 días, Wilma, 2005, el más intenso registrado en el Atlántico y el décimo más intenso registrado a nivel mundial en categoría 5; Huracán Dean, 2007. Karl, 2010; Ernesto, 2012; Franklin 2017; Harvey, 2017 y Nate, 2017, han sido otros

huracanes que han afectado en menor medida el territorio quintanarroense (Hernández, Carreño, & Castillo, 2018).

La hipótesis planteada en este trabajo, es confirmada a través del análisis cartográfico temporal, ya que se pueden ver más notorios los cambios en la aparición y aumento de parcelas de siembra en los ejidos San Fernando, Salamanca, El Bajío, Paraíso y Nuevo Tabasco, por otra parte, cabe mencionar que para los 8 ejidos del área de estudio resalta más la escasa salud vegetal en los años 2013.

4.2. Conclusiones

En el análisis de los resultados, se pudo notar cuales fueron los años en los que cada ejido tuvo una mejor salud vegetal y una muy mala calidad de salud; en el ejido San Fernando se tuvo que en el año 2020 fue el mejor año con una vegetación saludable de casi el 77% en su área total y su peor año fue en el 2013 con el 6.1% de escasas de vegetación o baja densidad de siembra.

Al igual que San Fernando, el ejido La Buena Fe tuvo su mejor año en el 2020 con casi el 98% de su área total y obteniendo una nula presencia del nivel más bajo de salud vegetal. Por otra parte, el ejido que, en este caso, ha sido el que ha presentado una degradación casi completa en cuanto a su salud vegetal, es el de Salamanca, con solamente 11% del total de su área con una buena calidad de salud vegetal, contemplando que, en el año 2000, la vegetación de este ejido era casi 94% saludable, en 20 años esta vegetación saludable se desplomó en un 82.11%.

El Bajío tuvo su mejor salud vegetal en el año 2020 con un 73% del área total y en el 2017 presentó su nivel más bajo de salud con 16.1%. El ejido Paraíso, también presentó el nivel más alto de salud vegetal en el año 2020 con 68.3% del área total y el más bajo en el 2017 con casi el 12% de escasas de vegetación o baja densidad de siembra.

Payo Obispo, siendo el tercer ejido más grande del área de estudio, presentó su mejor salud vegetal en el año 2020 poco más del 50% su área total y como peor salud vegetal se obtuvo que fue en el año 2017 con un 44.1% del área total del ejido.

Como último tenemos a los 2 ejidos más grandes, el segundo siendo Nuevo Tabasco con un área de más de 7 mil hectáreas, de las cuales el 19% de su área total fue vegetación saludable, y el año en que su vegetación fue más escasa fue en el año 2013 con poco más del 38% del total de su área; como primer ejido, siendo el más grande de todos los ejidos de nuestra área de estudio, está Manuel Ávila Camacho con un casi 95% de vegetación saludable en el año 2020, recuperando su vegetación saludable en un 18% desde el año 2000, y un 14% de vegetación escasa o escasa siembra en el año 2013.

Como se vio en los resultados, el ejido de Salamanca el que ha tenido una mayor deforestación y de casi el 100% del total de su área ha sido destinada para parcelas de siembra, por otra parte, este ejido ha sido el único al que se asistió para corroborar visualmente los resultados presentados, se obtuvieron fotos de la comunidad menonita que vive en este ejido, el tipo de maquinaria que utilizan, parcelas, agroquímicos utilizados, entre otros. Cabe mencionar que se le hicieron algunas preguntas a un habitante de Salamanca, el cual mencionó que viven alrededor de 200 familias esparcidas por toda el área y algunos de los habitantes no solamente tienen parcelas, sino también ganado y se dedican al comercio de sus productos como el queso, galletas, limón, tomate, maíz, etc.

La tala de árboles ha sido también parte de la obtención de madera y carbón como recursos naturales en los nuevos hoteles de la zona, este podría ser también uno de los factores de deforestación en el municipio de Bacalar, cabe mencionar que la ciudad de Bacalar ha aumentado en los últimos años la cantidad de hoteles y ha crecido como sector turístico por la Laguna de Bacalar. La importancia de un estudio como este, es para poder saber qué es lo que estamos haciendo con nuestros recursos naturales, ayudar a conservar nuestra diversidad de especies, aplicando las regulaciones que se marcan en la Legislación Ambiental de México; como se regula en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), donde por ejemplo se mencionando algunas fracciones del artículo 1°:

Fracción I. Garantizar al derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;

Fracción III La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;

Fracción IV La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas;

Fracción V El aprovechamiento Sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.

Por otra parte, la Ley General de Desarrollo Forestal sustentable (LGDFS), comparte los mismos ideales en cuanto al aprovechamiento sustentable, la conservación y la preservación de los recursos naturales.

Para concluir algunas de las soluciones para la conservación de nuestro ambiente podrían ser la ejecución de más evaluaciones y estudios de impacto ambiental en cada proyecto o actividad que se desarrollan en el país, hacer campañas de concientización ambiental enseñando a adultos, jóvenes y niños, la importancia y gran valor que tiene nuestro entorno.

Gracias al auge de las diversas herramientas geomáticas alrededor del mundo, podemos tener una oportunidad para evaluar diversos riesgos a los que está expuesto el medio ambiente, como se puede ver en este estudio, que conforme pasó el tiempo, se ha hecho más presente la deforestación por agricultura esparcida por el área.

Finalmente, cabe mencionar que sería de gran importancia continuar con un mapeo de todo el territorio Municipal de Bacalar, no solamente del NDVI, sino de los diversos Índices de Vegetación que existen para complementar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como lo es el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para monitorizar el estado de vegetación en caso de altas densidades de biomasa, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) para corregir la influencia ejercida por el suelo durante el cálculo del NDVI, el Índice de Clorofila Verde (GCI) el cual es utilizado para estimar el contenido de clorofila de las hojas en varias especies de plantas y evaluar la vigorosidad de las plantas, el Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura (SIPI) para evaluar el mayor valor de estrés de la vegetación, y el Índice de Calcinación Normalizado (NBR) que nos sirve para calcular o identificar cuantitativamente las áreas calcinadas por incendios forestales, y por ende un análisis de los mismos.

Bibliografía

- Agencia Espacial Mexicana. (13 de 02 de 2017). Introducción al procesamiento de imágenes Satelitales con Software Libre. -, Quintana Roo, México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Obtenido de www.gob.mx/aem
- Alonso, D. (05 de 09 de 2017). *MappingGis*. Recuperado el 17 de 06 de 2019, de MappingGis: <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>
- Álvarez, A., Belaunde, L., Chase, H., Dammert, J., Cañas, C., Gálvez, C., . . . Zúñiga, M. (2018). *DEFORESTACIÓN EN TIEMPOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*. Lima: Alejandro Parellada. Obtenido de <https://www.iwgia.org/images/documentos/deforestacin.pdf>
- Álvarez, S. (24 de Agosto de 2017). *Deforestación.net*. Recuperado el 07 de Julio de 2019, de Deforestación.net: <https://www.deforestacion.net/erosion-del-suelo-por-deforestacion>
- AQUAe FUNDACIÓN. (s.f.). *Wiki aquae*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/la-importancia-los-ecosistemas-la-biodiversidad/>
- Aragón, L. M., Treviño, E. J., Jiménez, J., Aguirre, O., González, M. A., García, M., & Aguirre, C. A. (Octubre-Diciembre de 2013). Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas en el centro-norte de México. *Ciencia UANL*, 43-54.
- Arduinna, S.A. (2020). *Destinos México*. Obtenido de <https://programadestinosmexico.com/pueblos-magicos/cenote-esmeralda-bacalar.html>
- Ávila, P. (Abril-Junio de 2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. *Ciencias(90)*, 46-57. Obtenido de <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/45-revistas/revista-ciencias-90/245-vulnerabilidad-socioambiental-seguridad-hidrica-y-escenarios-de-crisis-por-el-agua-en-mexico.html>
- Baumann, P. (2010). *GEO/SAT2*. Obtenido de GEO/SAT2: <http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/RS%20Landsat/RS-Landsat.htm>
- Bedoya, J. (1985). ECOLOGIA Y ECOSISTEMAS. *EL HOMBRE Y SU AMBIENTE*. MEDELLIN, COLOMBIA.
- Bello, E. (03 de 02 de 2021). NDVI: LA MEJOR HERRAMIENTA GRATUITA PARA EL MONITOREO AGRICOLA. *SALITEC*, 1, 1- 4. Obtenido de <https://satelitec.mx/blog/2021/02/06/ndvi-la-herramienta-gratuita-1-para-el-monitoreo-agricola-%F0%9F%94%B0%F0%9F%92%BB%F0%9F%9B%B0%F0%9F%92%AF/>

- Bolonia, C. (2 de 11 de 2016). *Reserva.com*. Obtenido de Reserva.com: https://www.lareserva.com/flora_fauna_de_mexico
- Casa Madrid, O., & Casa Madrid, T. (2017). *Historia y Geografía de Quintana Roo*. SANTILLANA. S.A. de C.V.
- Cazal, A., & Hernández, L. (Diciembre de 2015). Bacalar, Quintana Roo Historia y naturaleza para el desarrollo. En L. López, C. Valverde, A. Fernández, & M. Figueroa, *PUEBLOS MÁGICOS Una visión interdisciplinaria* (págs. 203-223). Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49811345/PM_volumen_1.pdf?1477242219=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPueblos_Magicos_una_vision_interdiscipli.pdf&Expires=1616394530&Signature=eShHoAs1DO0lZuOn8VGw1P7VtOt7kLTZI3jEkqx~GAesiwz1Hc4w-uK
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (20 de Enero de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conanp/prensa/la-reserva-de-la-biosferasian-ka-an-principal-reservorio-de-carbono-20727?idiom=es>
- Elizondo, C. (Marzo de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/pdf/PROFORCO/36-Memoria-Chetumal.pdf>
- Ellis, A., Romero, J., & Hernández, I. (2015). *Evaluación y mapeo de los determinantes de deforestación en la Península Yucatán*. México, Distrito Federal.
- EOS. (28 de Septiembre de 2020). *Earth Observing System*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/>
- EOS. (23 de 04 de 2021). *EARTH OBSERVING SYSTEM*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/agricultura-intensiva/>
- García G., S. B. (02 de agosto de 2005). *SciELO*. Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112005000300008&script=sci_arttext
- García, M., & Vargas, C. (2018). Vulnerabilidad y sistemas agrícolas: Una experiencia menonita en el sur de México. *Sociedad y Ambiente*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-65762018000100137&lng=es&nrm=iso&tlng=es#fn10
- GeoEnciclopedia. (20 de 09 de 2016). Obtenido de <https://www.geoenciclopedia.com/satelites-artificiales/>
- GisGeek. (07 de Mayo de 2014). *GisGeek*. Obtenido de <http://sig-geek.blogspot.com/2014/05/cuales-son-las-diferencias-entre-las.html>

- Gobierno del Estado de Quintana Roo. (Enero de 2020). *PORTAL DE GOBIERNO*. Obtenido de H. AYUNTAMIENTO DEL MUNICIPIO DE BACALAR: <http://www.bacalar.gob.mx/historiabacalar.html>
- Gómez, E., Barrasa, S., & García, A. (28 de Febrero de 2018). Paisaje litoral de la Laguna de Bacalar (Quintana Roo, México): ocupación del suelo y producción del imaginario por el turismo. *Investigaciones Geográficas*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Sara-Barrasa/publication/323459976_Paisaje_litoral_de_la_Laguna_de_Bacalar_Quintana_Roo_Mexico_ocupacion_del_suelo_y_produccion_del_imaginario_por_el_turismo/links/5ad4dbc7a6fdcc293580948a/Paisaje-litoral-de-la-Laguna-
- Gómez, J. (1998). *HISTORIA Y GEOGRAFÍA DE QUINTANA ROO* (PRIMERA EDICIÓN 1998 ed.). Chetumal, Quintana Roo.
- Hernández, M., Carreño, M., & Castillo, L. (2018). Methodologies and tools of risk management: Hurricane risk index (HRi). *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Hernández, S. (28 de Abril de 2014). *El Universal*. Obtenido de El Universal: <https://archivo.eluniversal.com.mx/estados/2014/menonitas-de-quintana-roo-un-viaje-al-siglo-xix--1006454.html>
- Herrera, G. (2017). *Geografía y Evolución Histórica de Bacalar*. Chetumal, Quintana Roo. Obtenido de <http://rasisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/1621/F1391.2017-1621.pdf?sequence=3>
- HUUBSAK. (2016). *HUUBSAK*. Obtenido de <http://www.selba.org.mx/>
- IBANQROO. (2016). Obtenido de <https://qroo.gob.mx/sites/default/files/unisitio2020/01/ANP%20BACALAR.pdf>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Obtenido de http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/23/23004.pdf
- INEGI. (2016). *INEGI*. Obtenido de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2016/702825084370.pdf
- INTAGRI. (2017). *Intagri*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-prottegida/los-factores-de-formacion-del-suelo#:~:text=El%20relieve.&text=El%20relieve%20influye%20en%20la,proceso%20de%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.&text=En%20cambio%2C%20las%20superficies%20m%C3%A1s,lo>

- Lagos, C. (06 de Julio de 2015). *Destinos México*. Obtenido de <https://www.mexicodestinos.com/blog/cenote-azul-el-paraiso-natural-en-bacalar-que-te-sorprendera/>
- Martínez, E., & Galindo, C. (12 de 2002). *Redalyc*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/577/57707101.pdf>
- MasterGIS. (10 de Enero de 2016). *YouTube*. (MasterGis, Editor, & Anónimo, Productor) Recuperado el Marzo de 2019, de <https://www.youtube.com/watch?v=AjAK1VRCbOs&t=212s>
- Morales, J. (1994). *Bacalar Dieciseis Siglos de Historia*. Secretaria del Gobierno de Quintana Roo.
- National Geographic. (05 de Septiembre de 2010). *National Geographic*. Recuperado el 07 de Julio de 2019, de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/deforestacion>
- Nuñez, J. (Noviembre de 2017). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/321371977_USO_DE_TECNOLOGIAS_GEOESPACIALES_PARA_EVALUAR_CAMBIOS_EN_LA_COBERTURA_FORESTAL_EN_LA_REGION_USUMACINTA_MEXICO
- Oliva, J., Ocaña, F., Navarrete, A., Jesús, R., & Vargas, A. (2016). Reproducción de Pomacea flagellata (Mollusca: Ampullariidae) en la laguna de Bacalar, Quintana Roo, México. *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442016000401643&script=sci_arttext
- Pons, X. (2009). *Wordpress*. Obtenido de Wordpress: https://blogpnt.files.wordpress.com/2009/06/xavierpons_sistema_landsat8.pdf
- Quadri, G. (17 de Agosto de 2017). Menonitas, deforestación e impunidad. *El Economista*.
- Registro Agrario Nacional. (2019). *Sistema de Información Geoespacial del Catastro Rural (SIG)*. Obtenido de Sistema de Información Geoespacial del Catastro Rural (SIG): <https://sig.ran.gob.mx/map.phtml?reset=session=GEOEXT,groups&config=default&intExt=23>
- Rocchio, L., Taylor, M., & Masek, J. (s.f.). *Landsat Science*. Obtenido de Landsat Science: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>
- Rodrigo Villar, G. (19 de Marzo de 2015). *Youtube*. (R. Vásquez Bernal, Editor) Recuperado el 29 de Enero de 2015, de BIOFÍSICA AMBIENTAL: <https://www.youtube.com/watch?v=DTiuJWLqJNU&list=PL4yKz4D2KIQuI2YYPDYPvymaG7pQz2bFM>
- SAGARPA. (2020). *SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN*. Obtenido de SIAPRENDES: <http://siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/2/01-agricultura/contexto-2.html>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (03 de mayo de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bala-an-ka-ax-importante-eslabon-del-corredor-biologico-sian-ka-an-calakmul>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (17 de Noviembre de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/area-de-proteccion-de-flora-y-fauna-uaymil-qroo>
- SEGOB. (2008). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de <http://dof.gob.mx/>
- SEMARNAT. (2005). *INFORME DE LA SITUACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN MÉXICO*. México: Desconocida. Obtenido de http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/informe_mex2005.pdf
- SEMARNAT. (2020). *gob.mx*. Obtenido de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_RF_ORESTA&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- SIGSA. (2020). *ESRI*. Obtenido de <https://www.sigsa.info/es-mx/what-is-gis/overview>
- SIIAEC. (Octubre de 2017). *Sistema Integral de Información Ambiental del Estado de Coahuila*. Obtenido de <https://www.sema.gob.mx/SRN-SIIAECC-USO-CAMBIO.php>
- Toribio, G. (25 de octubre de 2019). *cursos teledetección*. Obtenido de <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Tun F., V. H., Vester, H., Durán García, R., & Schmook, B. (2008). ESTRUCTURA ARBÓREA Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL NDVI EN LOS “BAJOS INUNDABLES” DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO. *Polibotánica*, 69-90.
- Turismo México. (16 de Febrero de 2021). Cenote Negro: La leyenda de la bruja de Bacalar. *Por Esto!* Obtenido de <https://www.poresto.net/turismo-mexico/2021/2/16/cenote-negro-la-leyenda-de-la-bruja-de-bacalar-238799.html>
- USGS. (2020). *USGS science for a changing world*. Obtenido de <https://glovis.usgs.gov/>
- Vivancos, J., Llastarri, A., Grau, M., & Vivancos, D. (2005). *Olimpiadas quindio*. Obtenido de http://olimpiadasquindio.ddns.net/principal/tierra/unidad3/sat_td.htm
- Zamora, M. C. (may/jun de 2016). Superficie Forestal actual. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(35). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322016000300004&script=sci_arttext

Anexo Fotográfico del Ejido Salamanca.



Entrada al ejido Salamanca (fuente: propia 2021)



Parcela de siembra (fuente: propia, 2021)



Medio de transporte de la comunidad menonita (Fuente: propia, 2021)



Maquinaria (Fuente: propia, 2021).



Parcela de Maíz (Fuente: propia, 2021)



Desechos de los agroquímicos utilizados (Fuente: propia, 2021)



Herbicida (Fuente: propia, 2021)



Insecticida (Fuente: propia, 2021)