



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

“CAMBIOS EN EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DEL ÁREA AGRÍCOLA DEL
VALLE DE GUADALUPE: 2006-2016”



Fotografía de Dr. Alejandro García Gastélum (Valle de Guadalupe, 2016)

TRABAJO TERMINAL
QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA
DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA
SHEILA SORAYA MAGDALENO ESQUER

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, AGOSTO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

"CAMBIOS EN EL INDICE DE VEGETACIÓN DEL ÁREA AGRÍCOLA DEL
VALLE DE GUADALUPE: 2006-2016"

TRABAJO TERMINAL
QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE ESPECIALIDAD EN GESTIÓN
AMBIENTAL

PRESENTA
SHEILA SORAYA MAGDALENO ESQUER

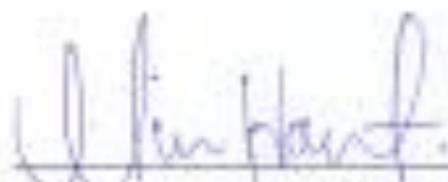
APROBADA POR:



Dr. Alejandro García Gastélum
Director



Dr. Georges Seingier
Sinodal



Dra. Michelle Hallack Alegria
Sinodal

Resumen

Baja California es el centro vitivinícola más importante de México, responsable de 90% de la producción nacional (IMIP, 2006), siendo el Valle de Guadalupe quien concentra la mayor superficie cultivada de vid para elaboración de vino, con un reciente y rápido crecimiento de carácter gastronómico-turístico, que representa una importante presión a los recursos naturales, particularmente el agua, debido principalmente, a los ciclos de sequía que caracterizan la zona, y se espera que el cambio climático agrave la condición; por ello surge la necesidad de evaluar la evolución de la cobertura agrícola con respecto a la precipitación. Con base en imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 del Valle de Guadalupe, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en ARCMAP 10.2, del año 2010 y para el periodo 2006-2016. Con datos de precipitación de 68 años de la estación meteorológica Olivares Mexicanos, se calculó el Índice estandarizado de precipitación (SPI) utilizando el software que provee el Centro Nacional de Mitigación de Sequías de Estados Unidos de América (NDMC por sus siglas en ingles). Se obtuvo una serie de imágenes representativas del valor de NDVI de los cultivos de vid y olivo durante el año 2010 (SPI: Húmedo), donde se obtuvo un valor máximo promedio de 0.42 y un valor mínimo promedio de 0.24, esta información se tomó como punto de partida para catalogar el nivel de los resultados obtenido en la serie de tiempo 2006-2016; en general se observa que el NDVI es mayor en el mes de abril y menor en agosto. En la última década el promedio de NDVI del suelo agrícola tuvo un mínimo de 0.26 en abril y 0.23 en agosto del 2014, considerando que el valor de NDVI promedio en condiciones climáticas húmedas es de 0.42, se cataloga de nivel bajo. Estos resultados fueron contrastados con los valores obtenidos de SPI anual, donde se observó que el año más húmedo fue el 2010 obteniendo el máximo de 1.4, en la escala de Mckee (1993), clasificándolo como año húmedo; por otra parte, el año más seco fue 2014, obteniendo un mínimo de -2.27, según la clasificación de Mckee (1993), representan sequía extrema, esta condición se recupera a inicios del 2015 con una sequía de severa a moderada para después alcanzar valores normales a mediados del año. Sobre sale el año 2014 por la elevada relación entre índices, coincidiendo los valores mínimos, sin embargo el valor de NDVI promedio para 2015 muestra una rápida recuperación con respecto al 2014, año en el cual se llegó a sequía extrema y en 2015 la sequía se mantiene hasta mediados del

año; por lo tanto una recuperación del verdor vegetal agrícola no puede ser efecto de las precipitaciones recibidas, es posible concluir que los productores de la zona agrícola del Valle de Guadalupe, incrementaron en 2015 la necesidad de riego para mantener la producción comercial, considerando que el acuífero VG se encuentra en veda es probable que el riego se lleve a cabo con agua de otra cuenca, es decir, actividades de trasvase de agua, lo cual favorece a la cobertura agrícola y a los intereses económicos de productores, sin embargo, presenta grandes impactos ambientales, por ejemplo la modificación de condiciones fisicoquímicas y biológicas del agua y suelo, o la geomorfología de la cuenca receptora, entre otros; es importante ampliar los estudios al respecto para poder sustentar la conclusión.

Palabras claves

Zonas áridas, NDVI, SPI, sequia, percepción remota.

Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado a nivel especialidad.
- A SEFOA por proporcionar información indispensable para la realización de este trabajo; especialmente a José Alberto Godínez Plasencia y a Patricia Sandoval Cázares, quienes lo hicieron posible, gracias por su amable y pronta respuesta. Muy agradecida por proporcionarme los shapes y evitar la duplicación y pérdida de tiempo, es un gran trabajo y un gran esfuerzo generar tan valiosa información.
- A la Facultad de Ciencias Marinas por ofertar este valioso posgrado, así como la oportunidad de ingresar al programa de especialidad en gestión ambiental.
- A todos los docentes del programa de Especialidad en Gestión Ambiental con los que tuve oportunidad de compartir horas de enseñanza, conocimiento, experiencias; siempre agradables y enriquecedoras conversaciones, gracias por su método de enseñanza, han fomentado cada uno de ustedes, un gran cambio en mi percepción del medio ambiente y su relación con la sociedad, han ayudado a crear un criterio más amplio del que tenía al llegar su aula.
- Al Dr. Alejandro García Gastélum, por la confianza, paciencia, apoyo y por siempre tener una sonrisa despreocupada y un comentario alentador. Gracias por hacer que perdiera el miedo a salir del mar.
- A los sinodales Dra. Michelle Hallack y Dr. Georges por su tiempo y comentarios para mejorar este trabajo y mi entendimiento.
- A la Dra. Ileana Espejel por sus revisiones, sugerencias y comentarios siempre honestos y acertados, me ha dejado mucho aprendizaje y admiración. Muchas gracias por salvarme de errores evidentes al ojo experto, pero sobre todo muchas gracias por ser tan atenta a la salud de sus estudiantes, seguiré toda la vida agradecida por la pomada mágica.
- A la Dra. Conchita Arredondo por ser ese pilar tan fuerte y tan admirable dentro del equipo académico de la especialidad. Gracias por siempre ofrecer su amplia experiencia y conocimiento especializado, así como una palabra de aliento, un buen consejo, una plática agradable e interesante, un café, un alimento, una

sonrisa, su tiempo... Usted es la generosidad hecha persona, gracias, por tanto. Hace que la estancia en la especialidad sea amena y agradable, uno logra sentirse en casa.

- A Misael Ruiz primero por explicarme parte de la metodología de una manera sencilla, por siempre responder mis dudas por correo rápidamente incluso cuando estaba fuera del país. Gracias por ayudarme tanto cuando mi programa no funcionaba, eternamente agradecida por salvarme en un momento crítico.
- A mis compañeros por compartir sus conocimientos previos, fue un año muy enriquecedor, gracias por su alegría y su frustración compartida, gracias por su humor en los peores momentos #mejoresqueoptimos, fue una grandiosa experiencia y seguimos caminando juntos en el aprender.
- A mi familia guineana el grupo de danza africana Inuali Fare, bailarinas, músicos, sin su alegría, energía y buena vibra, hubiese sido imposible mantenerme en estabilidad física y mental.
- A mi esposo Ernesto Carsolio por su apoyo, paciencia y dedicación a la familia que formamos. Gracias por ser el profesionalista cuando lo necesito, Gracias por ser mi paño de lágrimas cuando lo necesito. Pero te agradezco más que siempre creas en mí, y de lo que soy capaz de hacer, aun cuando yo no lo crea, gracias por presionarme e impulsarme a no rendirme, me ayudas a culminar las metas.
- A todos mis amigos y familia quienes de una u otra forma me ayudaron y apoyaron a culminar esta meta.

Índice

1. Introducción	2
2. Antecedentes	10
3. Objetivo general	15
3.1 Objetivos específicos	15
4. Metodología	16
4.1 Área de Estudio	16
4.2 Vegetación	17
4.3 Imágenes satelitales	18
4.4 Corrección Radiométrica	19
4.5 Índice de vegetación	21
4.6 Índice de precipitación.	22
5. Resultados y Discusión	23
6. Conclusión	39
7. Bibliografía	41
8. Anexos	45

Índice de figuras

<i>Figura 1. Impactos asociados a la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica. Fuente: modificada por Madrigal, s.a. (The National Drought Mitigation Center, 2014).</i>	5
<i>Figura 2. Área de estudio Microcuenca Valle de Guadalupe.</i>	17
<i>Figura 3. Curva de respuesta espectral de la vegetación y la respuesta espectral relativa (RSR) de las bandas Landsat TM y AVHRR en las porciones visibles e infrarrojo del espectro electromagnético. Fuente: Remote Sensing of Drought, 2012.</i>	18
<i>Figura 4. Historial de imágenes Landsat disponibles para descarga gratuita. Fuente: landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline</i>	19
<i>Figura 5. Ubicación del área agrícola y las parcelas aprovechadas por sus principales cultivos en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	23
<i>Figura 6. Porcentaje de uso de suelo agrícola aprovechado en el Valle de Guadalupe durante 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	24
<i>Figura 7. Porcentaje de los principales cultivos que cubren el suelo agrícola activo del Valle de Guadalupe durante 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	25
<i>Figura 8. Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017. Fuente: Elaboración propia.</i>	26
<i>Figura 9. Porcentaje de cambio en la cobertura para cada tipo de cultivo del 2013 al 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	27
<i>Figura 10. Comparación de cambio en % entre Vid y suelo en descanso, durante los últimos 3 años; se observa un comportamiento inverso. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	27
<i>Figura 11. Serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación de 1948 a 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA.</i>	29
<i>Figura 12. Extracción de la última década a partir de la serie de tiempo del Índice de precipitación estandarizado. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA.</i>	30
<i>Figura 13. Comportamiento de NDVI promedio para Vid y Olivo durante un año húmedo en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia.</i>	31
<i>Figura 14. Serie de tiempo mensual del comportamiento del NDVI del cultivo de Vid, durante 2010. Fuente: Elaboración propia</i>	33

<i>Figura 15. Serie de tiempo mensual del comportamiento del NDVI del cultivo de Olivo, durante 2010. Fuente: Elaboración propia.</i>	33
<i>Figura 16. Representación de $NDVI_T$ promedio del uso de suelo agrícola durante la primavera de la última década. Fuente: Elaboración propia</i>	34
<i>Figura 17. Representación de $NDVI_{v-o}$ correspondiente a cultivos de Vid y Olivo durante la primavera de la última década. Fuente: Elaboración propia.</i>	34
<i>Figura 18. Representación de $NDVI_T$ promedio del uso de suelo agrícola durante el verano de la última década. Fuente: Elaboración propia</i>	35
<i>Figura 19. Representación de $NDVI_{v-o}$ correspondiente a cultivos de Vid y Olivo durante el verano de la última década. Fuente: Elaboración propia.</i>	35
<i>Figura 20. Comportamiento de $NDVI_T$ promedio del uso de suelo agrícola del VG durante la última década. Fuente: Elaboración propia.</i>	36
<i>Figura 21. Fluctuaciones de NDVI promedio del suelo agrícola contrastando con SPI. Fuente: Elaboración propia.</i>	38

Índice de tablas

<i>Tabla I. Categorías para cada rango de valores de acuerdo con McKee, 1993. Fuente: Hallack, 2011, modificación propia.</i>	8
<i>Tabla II. Relación de imágenes analizadas. Fuente: Elaboración propia</i>	19
<i>Tabla III. Área cubierta por los principales tipos de cultivo del suelo agrícola del Valle de Guadalupe en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	24
<i>Tabla IV. Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017. Fuente: Elaboración propia.</i>	25
<i>Tabla V. Cambio en la cobertura por tipo de cultivo del Valle de Guadalupe en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	26
<i>Tabla VI. Cambios en el cultivo de la vid entre 2013-2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.</i>	27
<i>Tabla VII. Valores de SPI más bajos durante la temporada de lluvias del periodo 1968-2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgado por CONAGUA.</i>	29
<i>Tabla VIII. Valores NDVI obtenidos para los cultivos en 2010. Fuente: Elaboración propia</i>	32
<i>Tabla IX. Clasificación generada para los cultivos de VG durante primavera y verano. Fuente: Elaboración propia</i>	32
<i>Tabla X. Datos NDVI τ promedio para el periodo 2006-2016, clasificados según la propuesta generada para VG. Fuente: elaboración propia.</i>	37
<i>Tabla XI. Datos de NDVI y SPI correspondientes a primavera del periodo 2006-2016 clasificados según las escalas correspondientes. Fuente: Elaboración propia.</i>	38

1. Introducción

Las regiones mediterráneas se localizan en el oeste de los continentes, entre los 30° y los 45° de latitud, es decir, el entorno del Mar Mediterráneo, California central y meridional, Australia suroccidental y la costa chilena; se caracterizan por veranos cálidos y secos e inviernos templados y lluviosos, son regiones de alto riesgo ante el cambio climático, ya que es probable que se genere una sequía extrema, de mayor frecuencia e intensidad, el centro de investigación ecológica y aplicaciones forestales de la Universidad de Barcelona (CREAF, 2014) prevé a nivel internacional un aumento de la temperatura de hasta 6°C en algunas estaciones del año y una disminución de la precipitación del 30-45% hacia finales de este siglo.

Baja California es el único estado de México que cuenta con una región de clima mediterráneo, esta se encuentra dentro de la faja subtropical de alta presión que en verano migra hacia el norte, quedando bajo la influencia de los vientos alisios que pierden casi toda la humedad, por lo que la precipitación es escasa en ese periodo. Sin embargo, en el invierno la faja subtropical se desplaza hacia el sur, quedando expuesto a los vientos del oeste que recogen humedad a su paso por el Pacífico originando lluvias (Reyes-Coca, 2004).

Las lluvias de invierno están asociadas a las tormentas extra tropicales originadas en las regiones subárticas del Pacífico norte, controladas por un centro semipermanente de alta presión localizado sobre el Pacífico oriental, así como por los vientos de gran intensidad en la alta troposfera. El centro de alta presión se desplaza hacia el sur, permitiendo que las tormentas penetren más fácilmente hacia Baja California, favoreciendo la precipitación en forma de lluvia en las planicies costeras y en forma de nieve en las sierras; en condiciones de bloqueo invernal (cuando el centro anticiclónico está muy estable e intenso), la corriente de chorro canaliza las tormentas hacia el norte, estas condiciones impiden la entrada de las tormentas a la península, propiciando condiciones de sequía y déficit de agua. Durante el verano, el centro de alta presión se desplaza hacia el norte, bloqueando el paso de las tormentas en la región occidental de la península y desviándolas hacia Estados Unidos, el efecto combinado de este sistema de alta presión con vientos descendentes que tienden a calentar y secar la

atmósfera y las aguas frías superficiales de la corriente de California, favorecen la formación de una delgada capa de aire marino relativamente húmeda y fría, asociada a las neblinas costeras y al clima templado a lo largo del año en las planicies costeras. Por arriba de esta capa de aire marítimo, la atmósfera es cálida, seca y libre de nubes. Durante las estaciones de transición (otoño y primavera), el sistema de alta presión se hace más inestable y puede desplazarse hacia la región continental de Norteamérica o simplemente acentuarse la alta presión continental y generar las conocidas condiciones Santana en la península, con vientos intensos provenientes del este, muy secos y cálidos, reduciendo drásticamente la humedad, despejando los cielos de nubes, favoreciendo una gran evaporación, pérdida de agua superficial e incendios (Reyes-Coca, 2004).

El servicio meteorológico nacional reporta para Baja California una precipitación anual promedio 177 mm; clasificándolo como el estado con mayor grado de sequía del país, y a su vez el municipio de Ensenada (que corresponde al 99.85% de la superficie del estado) se clasifica con sequía severa (Armenta, 2015). Por otra parte, el Instituto Nacional de Ecología prevé un escenario cíclico hidrológico nacional, con tendencia a una reducción considerable en las precipitaciones anuales del 5 al 10 %, con un aumento en la temperatura de 1 a 3°C para el 2020 y 2050, afectando todo el país, principalmente la zona norte.

Respecto al cambio climático, de acuerdo con información del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México, se espera que en invierno Baja California sea una de las regiones que presentará un mayor descenso de precipitación, con reducciones de alrededor del 20% en relación al periodo correspondiente cien años atrás. Por otro lado, los promedios anuales de las proyecciones de precipitación indican que Baja California tendrá el mayor decremento en precipitación anual con valores de 21% con respecto a la climatología base, de los último 50 años. Por lo tanto, para 2030 se tendrá una reducción de alrededor de 10% de la precipitación, lo cual ocasionará una reducción proporcional en el volumen utilizado en los Distritos y Unidades de Riego, específicamente en el área con derecho de riego actual (CONAGUA, 2012b).

La microcuenca del Valle de Guadalupe abarca una superficie de 95,600 Ha, se localiza en el estado de Baja California como parte del municipio de Ensenada, se

constituye por las delegaciones municipales El Porvenir, Francisco Zarco, San Antonio de las Minas e Ignacio Zaragoza, así como por los valles agrícolas de La Misión, San Antonio de las Minas y Valle de Guadalupe (SEDESOL,2006).

El Valle de Guadalupe se localiza 25 Km al norte de la ciudad de Ensenada y 85 Km al sur de la ciudad de Tecate, cuenta con una temperatura media de 16.9 °C, con extremos registrados de -9°C y 45.5°C (Leyva y Espejel, 2016), posee un micro-clima mediterráneo que es propicio para las actividades vitivinícolas, sin embargo, es una zona semiárida de alta variabilidad interanual en precipitación, donde se presentan períodos de sequía o años sucesivos con precipitaciones inferiores al promedio anual (CNA, 2006 en Hallack-Alegría, 2011). La principal actividad económica es la agrícola, con cultivos de tipo mediterráneo como la vid, olivo, cítricos, diversos frutales, algarrobo, hortalizas como berenjena, chile morrón, etc., además, se cultivan flores, maíz, tomate, papa, alfalfa y hierbas de olor. Otras actividades que se desarrollan son turismo recreativo, ecoturismo, conservación, agroindustria, rancherías, conjuntos habitacionales y actividades relacionadas con el sector comercial y de servicios, así como ganadería intensiva y extensiva a una menor escala que la agricultura. La actividad industrial en la región está directamente relacionada con la actividad agrícola, entre las empresas destacan por su tamaño de producción L.A. Cetto, Domecq y Vinisterra, actualmente se producen alrededor de 1.2 millones de botellas al año.

Los principales productos agrícolas cultivados en el Valle de Guadalupe son la vid (36% del uso de suelo agrícola) y el olivo (22% del uso de suelo agrícola), que en conjunto representan más de la mitad del área agrícola del valle, el 37% del uso de suelo agrícola se encuentra en condiciones de descanso y solo el 5% del área cultivada se utiliza en otros 18 productos (SEFOA, 2016); considerando lo anterior el presente trabajo enfoca discusiones sobre estudios preliminares referentes a los dos principales cultivos del Valle de Guadalupe.

La sequía puede ser definida simplemente como la falta de agua; sin embargo, puede deberse a causas, físicas, ecológicas, sociales, económicas y políticas (Figura 1). Las causas más conocidas son: baja precipitación (sequía meteorológica); lluvias de un ciclo anual por abajo del valor normal (sequía climática); disminución del caudal en ríos

(sequía fluvial); acuíferos con niveles bajos (sequía geológica); actividades humanas afectadas por déficit de agua (sequía socioeconómica). En síntesis, se tendrá una sequía cuando en un lugar y durante un tiempo determinado, la recarga del agua sea menor que la extracción de agua (Reyes Coca, 2004).

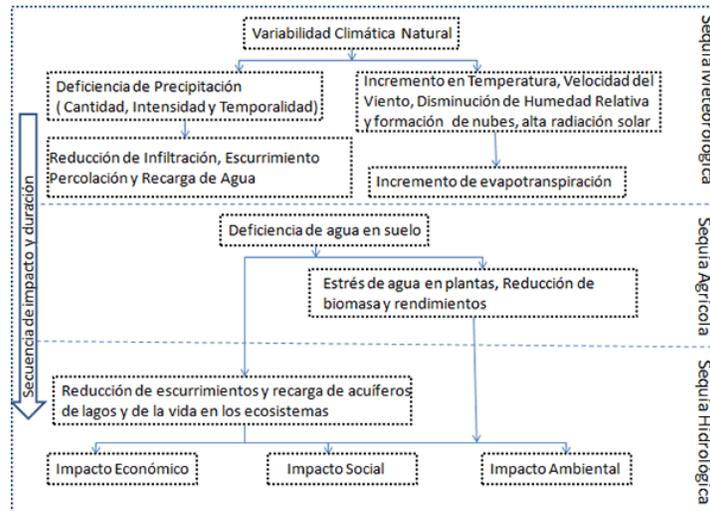


Figura 1. Impactos asociados a la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica.
Fuente: modificada por Madrigal, s.a. (The National Drought Mitigation Center, 2014).

La sequía meteorológica se define como "el periodo de tiempo prolongado que puede ser meses o años, que al principio puede ser una deficiencia de humedad, pero puede caer por debajo de lo climatológicamente esperado al no tener un aporte de humedad apropiado" (Palmer, 1965); por otra parte la sequía agrícola se deriva de la sequía meteorológica y su relación con los cultivos, se considera como un proceso en términos del balance de humedad, es decir: evalúa la evapotranspiración real y potencial; el déficit de agua en el suelo que a su vez depende de características físicas del mismo; los niveles de reserva de agua considerando la especificidad del cultivo en cuanto a sus requerimientos de humedad en función de la etapa de crecimiento y la biología de la planta (Madrigal, s.a.).

En Baja California las sequias están altamente influenciadas por el fenómeno tropical de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (Reyes Coca y Troncoso Gaytán, 2004), cuando se presenta un evento cálido de ENOS (El Niño), suceden precipitaciones por encima de lo normal en la región (Reyes Coca et al., 2004), si éste es muy fuerte, la precipitación de invierno puede ser muy abundante y provocar inundaciones. Por el contrario, cuando se presenta un evento frío de ENOS intenso (La Niña), la precipitación

de invierno disminuye drásticamente, y se tienen grandes posibilidades de un incremento en el número de sequías (Kiladis y Díaz, 1989; McCabe y Dettinger, 1999), sin embargo, El Niño influye las precipitaciones, pero no necesariamente las produce (Reyes Coca, 2004).

Existen evidencias de periodos de sequía históricos en el estado, uno de los inviernos más secos registrado fue el de 1971-1972, cuando se registró poco más de la tercera parte de lo observado en un año normal. Observando una serie de tiempo histórica de la precipitación, los valores extremos en la precipitación invernal coinciden dentro de periodos de varios lustros o décadas en que las lluvias mostraron en general una marcada abundancia (década de los 30 a principios de los 40; y del 1977 al 1998) o una marcada reducción (años 40 a mediados de los años 70 y de 1998 a la fecha).

Durante el periodo 1943-1976 se observaron eventos “La Niña” más frecuentes y relativamente intensos, por el contrario, desde 1977 hasta 1998 se observó un incremento gradual en la frecuencia e intensidad de los eventos cálidos de “El Niño”. A partir de 1999, se ha observado un cambio en la temperatura del océano Pacífico, fenómeno conocido como Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), en donde la región oriental se está enfriando, lo que está asociado a una disminución de eventos El Niño y al incremento de eventos La Niña. Entonces la sequía que padecemos en Baja California desde el invierno de 1998-99, pudo haber sido el inicio de un periodo de bajas precipitaciones, lo que se traduciría a condiciones de sequías similares a las de 1943-76.

Hernández Cerda y Valdez Madero en 2004, calcularon un índice de severidad para la serie temporal de 1950-1980, para todo el país, este dio como resultado valores de sequía extremadamente severa para Baja California, donde registró una larga temporada de sequía de principios de los años 40 hasta 1980. En abril de 2013, Baja California recibió apenas el 3% de lo normal, quedando como el octavo abril más seco desde 1941 (CONAGUA, 2014).

La precipitación es cuantificada en estaciones meteorológicas, a partir de estos registros es posible detectar anomalías en el régimen de precipitación, y alimentar algoritmos de índices e indicadores que permiten clasificar un periodo de tiempo como húmedo o seco, así como su intensidad. Uno de los indicadores más utilizados es el

Índice de precipitación estandarizada propuesto por McKee en 1993, es el estándar aceptado a nivel mundial, fue recomendado en la reunión de la OMM celebrada en diciembre de 2009 en Lincoln, Nebraska, como el principal índice de sequía a ser usado por organismos meteorológicos e hidrológicos nacionales para hacer seguimiento de la sequía meteorológica. Destacando por la facilidad de cálculo y su significado desde el punto de vista estadístico, para su cálculo se utiliza un mínimo de 30 años de registros de precipitación mensual, pero lo óptimo es utilizar 60 años de datos o más; estas series históricas se ajustan a la función de distribución probabilística gamma, que de acuerdo con Thom (1966) y Young (1992), es la función de distribución que mejor ajuste ofrece en series de precipitación. El SPI puede calcularse para distintas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48 meses), la escala de tiempo de 6 meses puede ser utilizada para la identificación eventos de sequía a corto plazo o de temporada, que afectan la agricultura a través de déficits en la humedad del suelo o reducciones en los cultivos; las escalas de 12 y 24 meses se manejan para sequías que presentan una amenaza a largo plazo en los recursos hídricos, como son disminución en niveles del agua subterránea y reducciones de almacenamiento en presas (Labeledzki 2007).

Los valores de SPI representan el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico, aquellos registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente, presentarán valores del SPI positivos (condiciones de humedad), mientras que aquellos registros de precipitación inferiores al promedio histórico, arrojarán valores del SPI negativos (déficit de humedad); McKee en 1993, propuso una clasificación de intensidad de humedad según el valor SPI que obtuvieran (Tabla I), se considera que la sequía comienza en el momento que el SPI baja de cero y termina cuando el SPI alcanza condiciones de humedad indicado por valores positivos (McKee et al. 1995 en Hallack-Alegria 2011).

Tabla 1. Categorías para cada rango de valores de acuerdo con McKee, 1993.
Fuente: Hallack, 2011, modificación propia.

SPI	Intensidad de humedad	Sequia
+ 2	Extremadamente húmedo	
+ 1.5 a +1.99	Muy húmedo	
+1.0 a +1.49	Moderadamente húmedo	
+0.99 a -0.99	Normal	
-1 a -1.49	Moderadamente seco	moderada
-1.5 a -1.99	Severamente seco	severa
-2	Extremadamente seco	extrema

Los impactos de la sequía en la agricultura se han presentado a lo largo de la historia de la humanidad, siendo la razón de grandes pérdidas económicas, cambios políticos y en el medio ambiente. Los efectos de la sequía en distintas especies de plantas han sido cuantificados (Asbjornsen, 2004) como: reducción en el número y tamaño de las hojas de las plántulas, mortalidad de individuos, reducción del crecimiento, aumento de la defoliación, entre otras. En términos generales la reducción en el régimen de precipitaciones afecta la capacidad fotosintética de las plantas por pérdida o reducción de material fotosintético. Estas relaciones han sido demostradas mediante experiencias de campo, toma de muestras o experimentos controlados.

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices de vegetación relacionados con el verdor (Chuvienco, 1998).

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales de imágenes raster, tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales en un algoritmo diseñado para obtener un valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel, han sido usados en una gran variedad de contextos para evaluar la biomasa, para climas áridos (Jiménez, 2010).

El NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) ha sido el más usado en teledetección de vegetación durante las dos últimas décadas. Fue desarrollado por Rouse et al. (1973) a partir del análisis de datos de Landsat-MSS. El numerador es la diferencia entre los valores de la banda infrarroja y los valores de la banda roja, sin

embargo, dicha diferencia se encuentra dividida entre la suma de ambos valores, esta normalización mantiene los valores en el rango de -1 a 1 lo cual facilita notablemente su interpretación. La vegetación viva siempre tiene mayor reflectancia en el IRC que en el R, por lo tanto, su NDVI es mayor que 0. Los valores 0 a 0.1 indican rocas y suelo desnudo y menores a 0 indican nubes, hielo, agua o nieve (Dutta, 2013).

Una gran cantidad de trabajos han confirmado al NDVI como un índice robusto en comparación con otros índices de vegetación, algunos de los cuales han mostrado su utilidad en condiciones especiales, pero ninguno ha resultado tan confiable ante un rango muy amplio de condiciones de crecimiento, cultivos, o coberturas vegetales de todo tipo. El NDVI se ha usado para describir cobertura vegetal, clasificación vegetal y fenología vegetal (Tarpley, 1984, Tucker, 1985 en Dutta, 2013); estudios que analizan las variaciones interanuales de los diferentes tipos de vegetación han demostrado la utilidad del NDVI en zonas áridas (Weiss, 2004 en Delgado, 2014).

Autores como Tucker y Dutta han demostrado que el NDVI y el SPI son buenos indicadores para el monitoreo de la sequía en zonas áridas, así como para cuantificar los efectos de la sequía en la agricultura, con base en lo anterior y considerando que los principales productos cultivados en el Valle de Guadalupe son el olivo y la vid, el presente trabajo enfoca sus objetivos y el análisis de resultados hacia estos productos, tomando como punto de contraste estudios previos en zonas áridas de condiciones similares.

El presente trabajo pretende dar respuesta al desconocimiento de cómo influyen los cambios en la precipitación en la permanencia de las actividades agrícolas del Valle de Guadalupe.

2. Antecedentes

El NDVI se ha usado para estimar gran número de variables: el índice de área foliar, el flujo neto de CO₂, radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, productividad neta de la vegetación, contenido de clorofila, dinámica fenológica, evapotranspiración potencial y cantidad de lluvia recibida por la cubierta vegetal. Las aplicaciones más habituales son: para el seguimiento de las condiciones de la cubierta vegetal a escala global, estudios de deforestación, desertización, caracterización de biomas a escala global, prevención de sequía y riesgo de incendios forestales a partir del análisis de series multitemporales. (Jiménez, 2010)

Rudoff en 1985, planteo que si el NDVI es empleado en conjunto con imágenes Landsat y datos agro-meteorológicos resulta una técnica útil para estimar la productividad de un cultivo; por otro lado Ji-hua y Bing-fang (2008), Machado (2007), Frasson (2007), Krishna Rao (2002) y Simoes Dos Santos (2005) concluyen que es una medida cuantitativa del vigor del cultivo, lo cual denota la estimación de la biomasa total y el estatus de salud de la plantación relacionada directamente al rendimiento de campo.

El NDVI se considera un indicador indirecto de la sequía agrícola, debido a que la precipitación es el factor responsable del crecimiento de la vegetación, por lo tanto, se puede probar que la precipitación y el NDVI se correlacionan el uno con el otro (Dutta, 2013).

En un estudio realizado por Johnson en 2001 se calcularon valores de NDVI a partir de imágenes satelitales IKONOS, estos se correlacionaron con el índice de área foliar obteniendo $R^2 = 0,74$ y para el área foliar por planta en vid se obtuvo $R^2 = 0,78$. Con base en estos resultados Vila en 2007, menciona que el NDVI se correlaciona significativamente con la biomasa en vid y que la utilidad del uso de imágenes e Índices de Vegetación para estimar biomasa, depende en gran medida de la superficie foliar, el vigor de las plantas y el rendimiento de fruta (Kliwer y Dokoozlian, 2005; Haselgrove et al., 2000; Petrie et al., 2000).

El cultivo de la vid se caracteriza por sufrir sequías estacionales en la mayoría de las regiones productoras, situación que se incrementa en ambientes áridos y semiáridos

(Bavestrello, 2012), en la vida las respuestas comunes al estrés hídrico incluyen cambios tanto en el metabolismo de hormonas, como en procesos de fotosíntesis, crecimiento, transcripción y señalización entre otros, los cuales han sido confirmados mediante análisis fisiológicos y moleculares (Cramer, 2010 en Bavestrello, 2012).

Hallack en 2011 recomienda el uso de estimaciones del SPI y de análisis de sequías regional para monitorear sequías meteorológicas y para ser utilizadas como una componente clave en un plan de manejo de sequías. Menciona también que el índice SPI es una herramienta útil para evaluar condiciones climáticas en la cuenca del arroyo VG.

Hallack en 2011 calculó valores SPI para el periodo 1950 – 2008 en la escala de tiempo de 24 meses en la cuenca del arroyo del Valle de Guadalupe, encontró evidencia de la presencia de características de sequía con valores de -1 a -2.5, se observan que tres episodios de sequía ocurrieron, en 1954 -1965, 1971-1973 y 2000- 2004 donde los períodos permanecieron por debajo del promedio por doce, tres y cinco años consecutivos, respectivamente. Se identificó un período extensivo de humedad 1977 a 1988, donde los eventos de precipitación se mantuvieron por 11 años consecutivos por arriba del promedio.

El programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del 2014 identifica dos periodos de sequía agrupados de 1954 a 1975 y de 1988 al 2013. Los estudios de Reyes y Troncoso, 2004, de precipitación histórica, confirman que el consejo de cuenca-02 al cual pertenece VG se encuentra en una etapa de sequía meteorológica.

El Centro de Investigación sobre la Sequía (CEISS) considera que con valores de SPI por debajo de -1.5 se pueden presentar pérdidas considerables o extensivas en cultivos y pastizales, riesgo de incendio extremo y escasez de agua generalizada en cuerpos de agua y pozos (UPM, 2013).

Dutta en 2013, ha abordado la predicción de la sequía agrícola mediante el rendimiento agrícola utilizando un modelo basado en NDVI-SPI. Observo que el SPI con diferentes escalas de tiempo se correlaciona con NDVI con un desfase de una quincena, es decir el NDVI de una fecha actual presenta una alta correlación con el SPI de una quincena anterior en zonas semiáridas y de transición. Esto se debe a que la lluvia de un mes no es notable en la vegetación de ese mismo mes, esta es notable a lo largo periodos

más largos de un mes (Jiandpeters 2003) Wang, 2003 dice que existen un retraso de entre 4 a 8 semanas.

Estudios previos en el Valle de Guadalupe documentan una tendencia a incrementar el área agrícola de riego dedicada a la vid; la superficie dedicada a la agricultura en 1946 consistía de 4,000 hectáreas de temporal y para 1988, la superficie irrigada era de 3,573 hectáreas equivalente a un consumo total de agua de 7.83 Mm³ considerando una lámina de riego por gravedad de 0.43 m (CNA, 2004). En relación al tipo de riego de la superficie cultivable, 65 por ciento corresponde a irrigación y 35 por ciento a temporal (Gaeta, 2006).

Gaeta- Lara en 2006, estima tendencias de incremento en el área cultivada para vid, con variedades que requieren mayor volumen de agua en el riego, debido a la diversificación del mercado de vinos, lo que detonaría cambios en la demanda de agua; hace hincapié en que hasta ese momento (2006) la asignación de agua a la ciudad de Ensenada no mostraba impactos en los niveles de productividad de la vid, sin embargo asegura que de continuar con estas tendencias y el crecimiento continuo en la demanda de agua de uso urbano de la ciudad de Ensenada, pronostica un conflicto de intereses que podría frenar el desarrollo de la agroindustria del vino, e implicaría una excesiva presión al acuífero. El mismo autor menciona que al comparar la recarga con la descarga del acuífero del Valle de Guadalupe durante el período 1980 - 2004, la mayor parte de los años la descarga excede a la recarga, por lo cual se presentan períodos consecutivos de sobreexplotación; sin embargo, los años que han presentado lluvias extraordinarias como 1998 han permitido recuperar el déficit de años anteriores. Debido a ésta incertidumbre meteorológica no es posible hablar de un valor de recarga promedio representativo de los períodos secos y húmedos, por ello, se tienen períodos con sobreexplotación en años secos y subexplotación en años lluviosos. Sin embargo, se ha demostrado que Norte América se encuentra en una transición a un clima cada vez más árido como parte de una tendencia de sequía general y una expansión hacia los polos de las zonas subtropicales secas (Held, 2006; Lu, 2007; Hallack-Alegría, 2005), así mismo, se sabe que el constante incremento en la demanda de agua, tanto por el crecimiento poblacional como por las áreas cultivadas ejerce una presión muy importante sobre la disponibilidad del agua subterránea en toda la región. Es de gran interés evaluar

nuevamente si la condición de recarga-descarga del acuífero descrita por Gaeta se ha mantenido para el periodo 2005-2017 y cuáles son las tendencias a futuro, ya que el normal desarrollo de los sectores económicos, se ve condicionado por la disponibilidad de agua de forma más o menos indirecta, cuando se produce un déficit hídrico temporal, las consecuencias pueden llegar a ser muy graves, desde pérdidas económicas hasta la aparición de procesos de degradación en la naturaleza como la desertificación (Vicente, 2004).

Meraz en 2012, menciona que, debido a las recientes sequías, la sobreexplotación del acuífero, las constantes heladas y los largos periodos de calor (Bodenstenddt, 2008; Meraz, 2009), se han observado irregularidades en la producción de la uva, aumentando en algunos años y disminuyendo en otros. Por otro lado, en el programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del 2014, menciona que la falta de agua para la agricultura en la región ya ha comenzado a afectar a cultivos.

El programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del 2014 cita que la principal problemática en el consejo de cuenca-02 es el desabasto de agua urbano, la falta de agua para la agricultura, la pérdida de potencial inversionista y conflictos sociales.

En respuesta a la problemática expuesta, Sánchez y Gándara (2011) han recomendado a los viticultores evaluar la eficiencia técnica y económica de la agroindustria en su conjunto considerando distintos varietales tanto los de temporal que requieren poca agua para su mantenimiento, como los varietales de mayor requerimiento hídrico; con el fin de optimizar el uso del agua y maximizar sus ganancias disminuyendo los costos de bombeo para irrigación y pérdidas debido a cosechas con bajos niveles de calidad.

En los últimos cinco años se ha percibido de manera informal el incremento de casas vitivinícolas y con ellas los cultivos de vid en la región, en contraste a las precipitaciones que presentan una tendencia a la baja, contrario con lo que sucede en los ecosistemas naturales, donde la biomasa vegetal es directamente proporcional a la precipitación.

Gaeta-Lara en 2006 ha sido el único estudio en el Valle de Guadalupe que ha realizado una cuantificación de los cambios de la cobertura agrícola. Con base en datos oficiales de SAGARPA del periodo 1994-2004, desde entonces hasta el momento no se han realizado estudios del cambio en la cobertura vegetal agrícola.

A la fecha no existen estudios que evalúen la relación entre cobertura agrícola y precipitación en el Valle de Guadalupe. El presente trabajo funcionará como una primera aproximación que abrirá mayores cuestionamientos sobre el tema.

Por todo lo anterior en el presente trabajo se realiza la evaluación del Índice de vegetación de la zona agrícola del Valle de Guadalupe en el periodo 2006 – 2016 y se contrasta con el Índice de precipitación durante el mismo periodo con el fin de determinar los cambios en la precipitación y su influencia en la permanencia de las actividades agrícolas.

3. Objetivo general

Evaluar el efecto de sequía sobre la vegetación agrícola en el Valle de Guadalupe, Baja California.

3.1 Objetivos específicos

- Estimar los cambios en el índice de vegetación en el periodo 2006-2016
- Clasificar el grado de sequía persistente entre el periodo 2006-2016
- Discriminar la relación entre sequía y el impulso agrícola

4. Metodología

4.1 Área de Estudio

La Microcuenca del Valle de Guadalupe (Figura 2) se encuentra situada a 25 Km al norte de la ciudad de Ensenada, y a 85 Km al sur de la ciudad de Tecate, en el noroeste del estado de Baja California; presenta una forma alargada con orientación noreste a suroeste sobre los márgenes del Arroyo Guadalupe, es una extensión de zona rocosa-montañosa con una elevación sobre el nivel del mar de 1.100 pies y un área de 96 055 hectáreas, en las coordenadas geográficas 32° 07' a 32° 02' de latitud norte y -116° 28' a -116° 47' de longitud oeste (Andrade, 1997, SEDECO, 2004 en Meraz, 2012). El clima es de tipo Mediterráneo, con una temperatura mínima media de 8° C y una máxima media de 21° C con pocas lluvias durante los meses de noviembre a marzo (Gaeta, 2006), sin embargo, la escasa precipitación es compensada por la alta humedad atmosférica producida por las nieblas marinas que cubren el matorral por varias horas del día (Meraz, 2012).

Se asientan los poblados Francisco Zarco, El Porvenir, Ignacio Zaragoza y San Antonio de Las Minas, cuentan con una población de 5 345 habitantes (INEGI, 2010).

La actividad económica preponderante es la agricultura cuenta con un total de 5 869 hectáreas, de las cuales: 2 160Ha son destinadas a la vid, 1 262Ha al olivo, 303Ha a otros 18 cultivos y 2 143Ha se encuentran en descanso (SEFOA, 2016).

El cultivo de vid y los productos derivados han generado un desarrollo económico turístico contando a la fecha con aproximadamente 77 casas vinícolas, desde pequeñas bodegas familiares hasta grandes empresas exportadoras (WEB PROVINO, SECTURBC, SPVBCAC; 2017).

La actividad industrial en la región está directamente relacionada con la agricultura siendo la vinificación la principal, se producen alrededor de 1.2 millones de botellas de vino al año (SEDESOL, 2006).

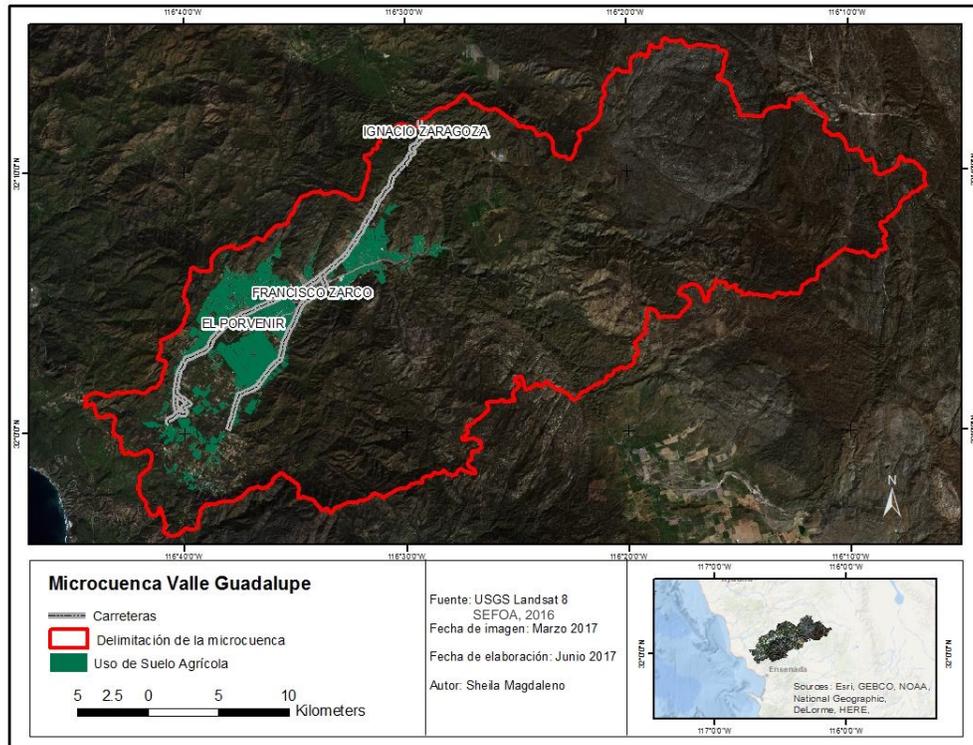


Figura 2. Área de estudio Microcuenca Valle de Guadalupe.

Fuente: Elaboración propia a partir de imagen Landsat 8 e información proporcionada por SEFOA 2017.

4.2 Vegetación

La vegetación tiene un particular comportamiento radiométrico (Figura 3), la proporción de luz incidente sobre las hojas, que es reflejada en el infrarrojo cercano (IRC) está determinada por la estructura celular de la hoja, es decir, la reflectancia de IRC resulta proporcional a la abundancia de mesófilo esponjoso, por lo tanto, en un área foliar abundante siempre presentara reflectancias altas de IRC, esté la hoja dotada de clorofila o no. Por otra parte, la clorofila y otros pigmentos absorben una gran porción de la región roja del espectro electromagnético, dicha absorción aumenta con el contenido de clorofila, de modo que la luz reflejada disminuye conforme las hojas tienen mayor concentración de clorofila. Por lo tanto, a mayor área foliar, mayor reflectancia en el infrarrojo cercano; y a mayor contenido de clorofila, menor reflectancia en el rojo; los valores de las reflectancias varían según el estado fenológico y el estrés hídrico de la planta, conforme un cultivo aumenta su vigor, o su productividad primaria bruta, crece la diferencia entre la luz infrarroja y la luz roja reflejada; Rouse et al. (1974a) demostró que las características biofísicas de la vegetación podrían inferirse de mediciones espectrales

de satélites debido a que este comportamiento radiométrico que impulsa la respuesta espectral de las plantas en dos regiones espectrales (IR y R), este patrón ha definido el diseño de instrumentos de teledetección y la derivación de diversas métricas para la supervisión de la vegetación.

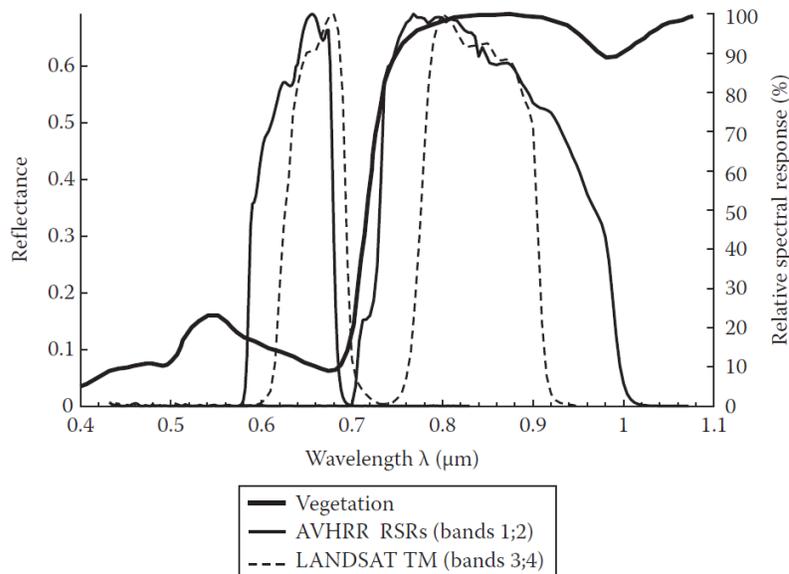


Figura 3. Curva de respuesta espectral de la vegetación y la respuesta espectral relativa (RSR) de las bandas Landsat TM y AVHRR en las porciones visibles e infrarrojo del espectro electromagnético.
Fuente: Remote Sensing of Drought, 2012.

4.3 Imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes Landsat Thematic Mapper 5 (LTM 5) y Landsat Thematic Mapper 8 (LTM 8) en formato GeoTiff (Tabla II); debido a que LTM 5 operó de 1984 a 2013 y LTM 8 opera de 2013 a la actualidad (Figura 4) las imágenes LTM 8 cuentan con 9 bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros, de las cuales se trabajó con la banda del Rojo (B4) y del Infrarrojo Cercano (B5); las imágenes LTM 5 cuentan con 7 bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros, de las cuales se trabajó con la banda del Rojo (B3) y del Infrarrojo Cercano (B4); todas las imágenes fueron obtenidas de forma gratuita del sitio <http://glovis.usgs.gov>. Se descargaron imágenes (pat 039 row 038) con cobertura de nubosidad máxima de 50%, siempre que esta fuese en el océano dejando visible el área correspondiente a la microcuenca del Valle de Guadalupe (Figura 2), se seleccionaron las correspondientes a la etapa de

floración de la vid (abril-mayo) y de la cosecha de la uva (agosto), se utilizó LTM 5 para el periodo 2006-2011 y LTM 8 para el periodo 2013-2016 (Figura 4). No se descargaron imágenes correspondientes al año 2012, debido a que estas se encuentran incompletas por fallas en el sensor, no son de útiles para los fines del presente trabajo.

Tabla II. Relación de imágenes analizadas. Fuente: Elaboración propia

Sensor	Resolución radiométrica	Año	Mes	Día juliano
LT5	8 bits	2006	mayo	148
			agosto	228
		2007	abril	103
			agosto	215
		2008	abril	106
			agosto	218
		2009	abril	108
			agosto	220
		2010	mayo	127
			agosto	223
2011	mayo	114		
	agosto	226		
LTM8	16 bits	2013	abril	103
			agosto	215
		2014	abril	106
			agosto	218
		2015	abril	93
			agosto	221
		2016	abril	112
			agosto	224

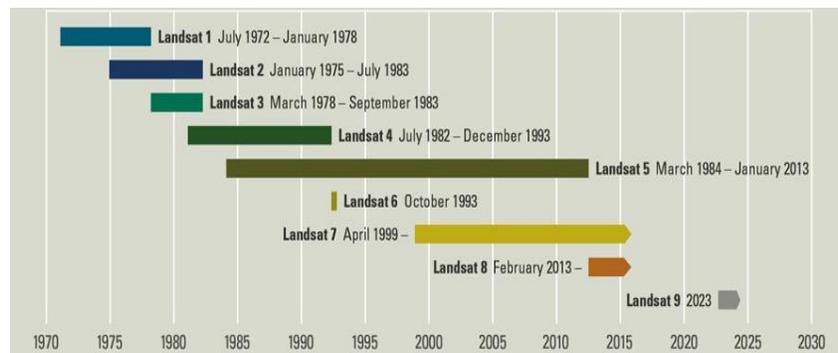


Figura 4. Historial de imágenes Landsat disponibles para descarga gratuita. Fuente: landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline

4.4 Corrección Radiométrica

La corrección radiométrica de una imagen permite expresar los valores digitales de cada píxel en unidades de reflectancia, reduce la interferencia indeseada debido a los efectos de la atmósfera, la iluminación diferencial causada por la hora del día, el lugar de la Tierra (zonas más o menos iluminadas, sombras, etc.), el relieve (ángulos de incidencia y sombras proyectadas), la posición solar, la distancia Tierra-Sol en el momento de

captación de la imagen, el amortiguamiento atmosférico en los caminos de ida y de retorno de la radiación para cada canal, densidad óptica atmosférica, irradiancia exoatmosférica solar y calibración del sensor (Chander, 2009)

El cálculo se ejecutó en la función calculadora raster en ArcMap 10.2 siguiendo las ecuaciones de Chander, 2009:

Corrección radiométrica para imágenes LTM 8 con:

$$(a) Ref = (Ref_{MUL} * Banda) + Ref_{ADDBAND}$$

Donde:

Ref = Reflectancia

Ref_{MUL} = Factor de reescalamiento multiplicativo para convertir VD a Reflectancia.

Banda = Banda espectral que se quiere corregir

Ref_{ADDBAN} = Factor de reescalamiento aditivo para convertir VD a Reflectancia.

Corrección radiométrica para imágenes LTM 5, requiere convertir valores digitales a radiancia con:

$$(b) L = \left(\frac{RAD_{max} - RAD_{min}}{QCAL_{max} - QCAL_{min}} \right) (Banda - QCAL_{min}) + RAD_{min}$$

Donde:

L = Radiancia espectral en la apertura del sensor

RAD_{max} = Radiancia espectral en el sensor escalado a QCAL_{max}

RAD_{min} = Radiancia espectral en el sensor escalado a QCAL_{min}

QCAL_{max} = Maximo valor cuantificado de pixel calibrado correspondiente a RAD_{max}

QCAL_{min} = Minimo valor cuantificado de pixel calibrado correspondiente a RAD_{min}

Banda = Banda espectral que se quiere corregir

Para convertir los valores de radiancia a reflectancia TOA se utiliza la ecuación:

$$(c) P = \frac{\pi L d^2}{ESUN \cos \theta}$$

Donde:

P = Reflectancia planetaria TOA

π = Constante matematica ~ 3.14159

L = Radiancia espectral en la apertura del sensor

d = distancia de la tierra al sol

ESUN = Irradiancia solar exoatmosferica media

cos θ = Angulo zenital solar

4.5 Índice de vegetación

El NDVI es un índice estandarizado de la vegetación creado por Rouse en 1973, este permite generar una imagen mostrando la biomasa relativa, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas (Delgado, 2014). Es usado para clasificar la sequía, supervisar y predecir la producción agrícola, asistir en la predicción de zonas en riesgo de incendio y desertificación.

El NDVI es un buen estimador de la biomasa y el más consistente para monitoreo de vegetación en ambientes y situaciones diversas, funciona muy bien para evaluar de manera rápida, a escala regional, la productividad de los cultivos con un nivel aceptable de precisión, tiene correlación con el contenido de humedad de la planta y puede ser aplicado en el control de cultivos debido a que las observaciones espectrales del follaje pueden utilizarse para monitorear las variaciones del crecimiento, que subsecuentemente pueden utilizarse como indicadores del estrés a que está sometido el cultivo e indirectamente, en la productividad del cultivo (Aguilar, 2010).

El NDVI se basa en la absorción máxima de pigmentos de clorofila en la longitud de onda roja (R) que oscila entre 0.63 y 0.69 μm y la reflectancia del infrarrojo cercano (IRC), que oscila entre 0.76 y 0.90 μm , matemáticamente representado con la formula

$$(d) NDVI = \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + Rojo)}$$

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

IRC = Banda espectral del Infrarrojo Cercano

Rojo = Banda espectral de rojo

Una de las mayores virtudes del NDVI radica en que, al sumar los valores de ambas bandas en el denominador, intensidades distintas de iluminación, compensan el valor del índice, es decir, en un cultivo que recibe más luz aumentaría proporcionalmente los valores del IRC y del R, con lo que la diferencia entre ambos resultaría de un valor absoluto mayor, esta diferencia se pondera al dividir por la suma de las bandas, por lo tanto, conforme la inclinación solar aumenta por la hora del día, o hacia el verano, el NDVI

mantiene valores semejantes para un estado particular de la vegetación. Así, permite comparar imágenes capturadas en momentos distintos, e inclusive minimiza la diferencia entre zonas del cultivo iluminadas y sombreadas (Towers, 2009)

Los posibles valores varían de -1 a 1, donde los valores positivos representan la vegetación (+1 máxima vigorosidad), los valores cercanos a cero representan roca o suelo expuesto, y los valores negativos representan agua, nieve o nubes.

El cálculo se ejecutó en la función, calculadora raster en ArcMap 10.2 siguiendo la formula (d).

4.6 Índice de precipitación.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es un indicador de sequía que puede ser utilizado como una herramienta para el monitoreo y análisis de este fenómeno, para su cálculo se utiliza un mínimo de 30 años de registros de precipitación mensual, los datos históricos de precipitación de la estación son ajustados a la función de probabilidad acumulada Gamma, esta es transformada a una variable aleatoria estándar normal, Z, con media igual a cero y desviación estándar igual a uno, de forma que si un evento particular de lluvia presenta una probabilidad baja en la función de probabilidad acumulada, es un indicativo de un evento de sequía. En contraste, si un evento de lluvia presenta una probabilidad alta en la función de probabilidad acumulada se refiere a un evento de inundación. El SPI también actúa como indicador de cuál es la relación entre la cantidad de lluvia precipitada con lo “normal o típico”, así podemos definir si se experimenta un período de sequía o no.

El SPI fue calculado para cada mes del período de registro, 1948 – 2016, para la escala de tiempo de 24 meses, ajustando una distribución Gamma como lo sugirió Wu et al. 2005 (Hallack, 2011). Los datos de precipitación mensual acumulada fueron proporcionados por CONAGUA de la estación meteorológica Olivares Mexicanos (2036), los datos de la estación fueron reconstruidos mediante la incorporación del promedio mensual de una serie de tiempo de 1936-2012 correspondiente a la base de datos de CLICOM-CICESE (Hallack, 2011). Los valores de SPI fueron calculados utilizando el software que provee el National Drought Mitigation Center, <http://drought.unl.edu/> (Centro Nacional de Mitigación de Sequías) de Estados Unidos de América.

5. Resultados y Discusión

El Valle de Guadalupe se caracteriza por contar con paisajes agrícolas de tipo mediterráneo muy atractivos al turismo gastronómico-enológico; tales como la vid, el olivo, el algarrobo, los cítricos, entre otros.

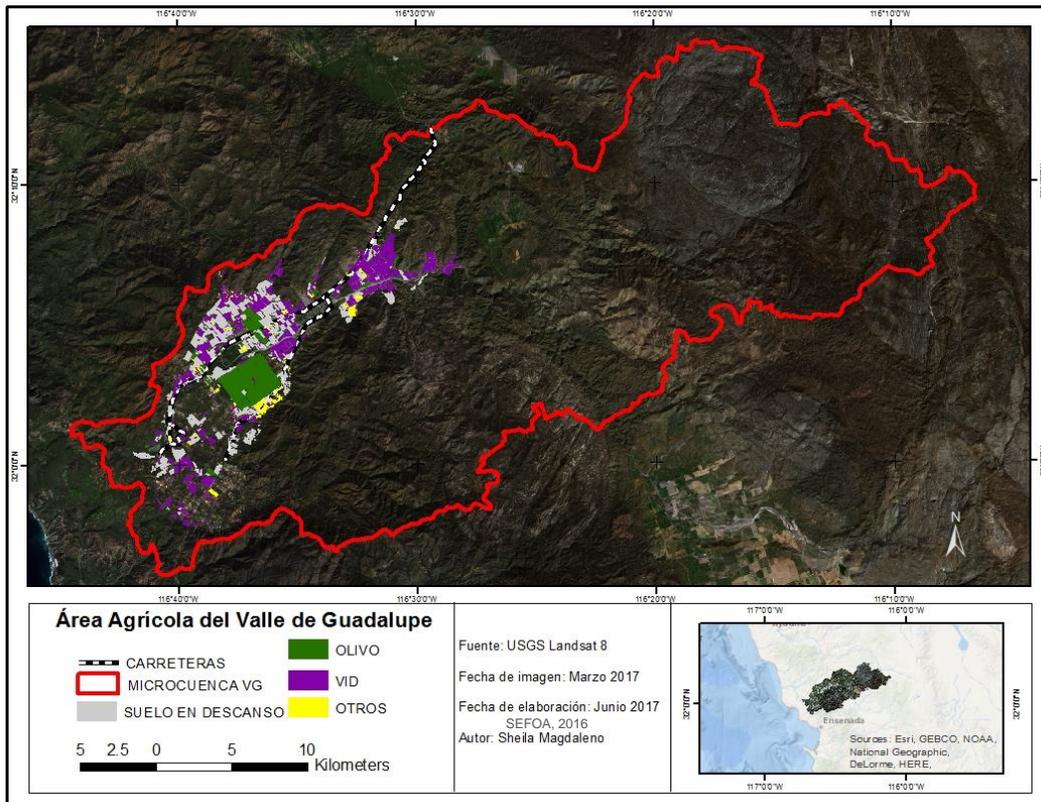


Figura 5. Ubicación del área agrícola y las parcelas aprovechadas por sus principales cultivos en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

El uso de suelo agrícola representa el 6% de la superficie de la microcuenca del Valle de Guadalupe (Figura 5), según datos oficiales proporcionados por SEFOA se ha mantenido constantes desde 2013 hasta 2016 (Tabla III), es decir, no se reportan incrementos del área destinada al uso de suelo agrícola.

Tabla III. Área cubierta por los principales tipos de cultivo del suelo agrícola del Valle de Guadalupe en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

TIPO DE CULTIVO	HECTAREAS			
	2013	2014	2015	2016
VID	2,093.7	2,123.2	2,137.1	2,160.1
OLIVO	1,123.4	1,240.4	1,247.0	1,262.0
OTROS	399.2	348.9	342.7	303.2
EN DESCANSO	2,252.7	2,156.5	2,142.2	2,143.8
TOTAL	5,869	5,869	5,869	5,869

El área agrícola registrada por SEFOA comprende 5 869 hectáreas totales de las cuales se encuentran en descanso el 36.5% (2,143.8 Has), y el 63.5 % se encuentra activo (3,725.2 Has); es decir, el Valle de Guadalupe no se encuentra en su máxima capacidad de aprovechamiento (Figura 6). Si consideramos solo el uso de suelo agrícola activo la vid representa el 58% (2,160 Has), el olivo el 34% (1,262 Has) y otros 18 tipos de cultivos tan solo un 8% (303.2 Has) (Figura 7); por lo tanto los cultivos más importantes de esta región son la vid y el olivo que en conjunto suman el 92% del uso de suelo agrícola activo, desde el punto de vista socioeconómico la SAGARPA en 2004 reporta que estos cultivos son los más importantes tanto por los ingresos económicos que representan, como por la generación de empleo que conllevan a los pobladores de las localidades donde se llevan a cabo.

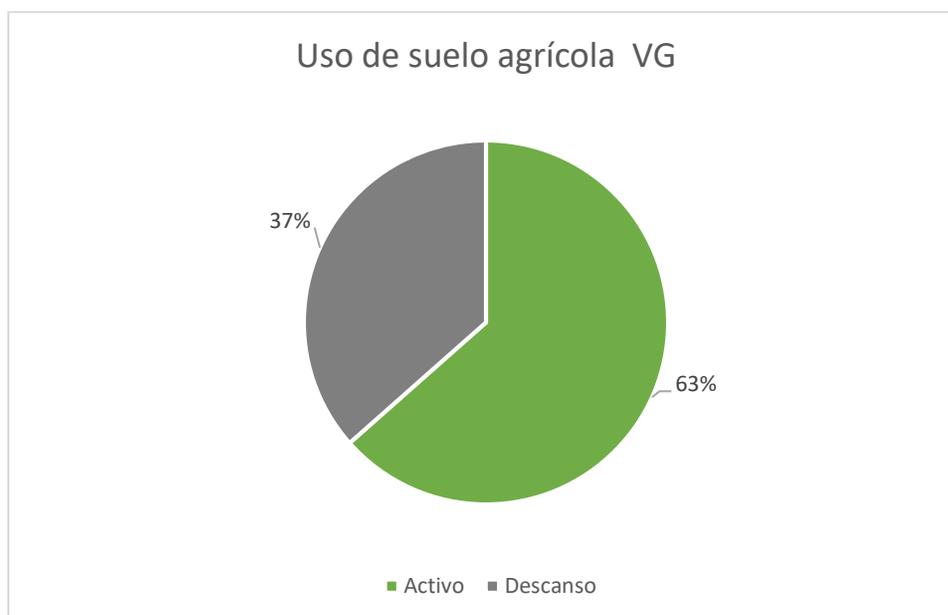


Figura 6. Porcentaje de uso de suelo agrícola aprovechado en el Valle de Guadalupe durante 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

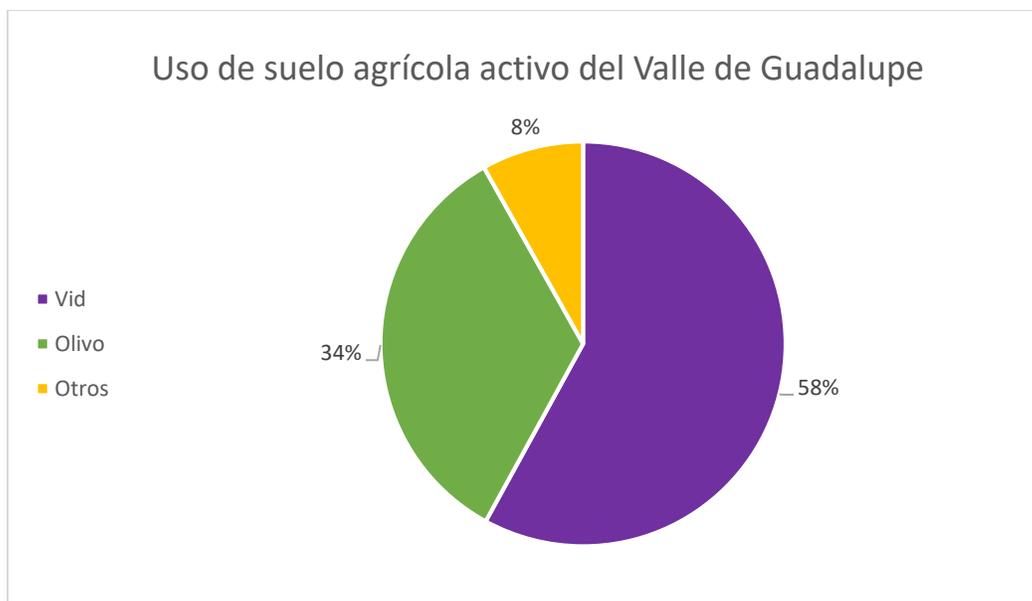


Figura 7. Porcentaje de los principales cultivos que cubren el suelo agrícola activo del Valle de Guadalupe durante 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

El producto vid ha generado un desarrollo económico-turístico que se ve reflejado en la creación de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe, estas van desde pequeñas bodegas familiares hasta grandes empresas exportadoras (Tabla IV); en 2004 IMIP reportó la presencia de 18 casas vinícolas, para 2013 González-Andrade reportó alrededor de 57, Bringas en 2014 reporta 60 y actualmente (2017) se enlistan cerca de 77 casas vinícolas (WEB PROVINO, SECTURBC, SPVBCAC); en un periodo de 13 años hubo un aumento del 328% (Figura 8).

Tabla IV. Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017. Fuente: Elaboración propia.

Año	N° de casas vinícolas	Fuente
2004	18	IMIP
2013	57	Andrade-González
2014	60	Bringas
2016	77	WEB: PROVINO, SECTURBC, SPVBCAC

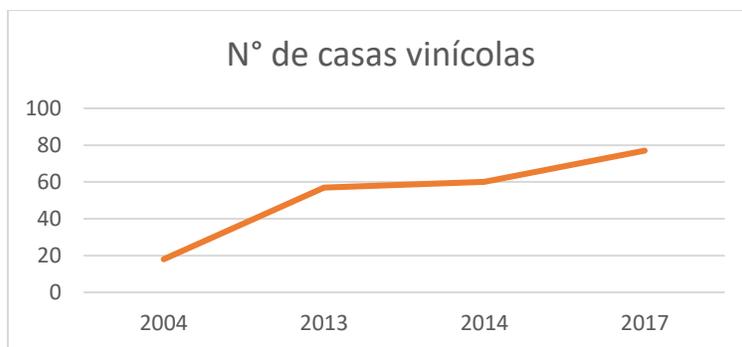


Figura 8. Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017.
Fuente: Elaboración propia.

En los últimos 3 años (2013-2016) hubo un incremento de 20 casas vinícolas, en términos agrícolas se observó un incremento del 3% (66.4 Has) en el cultivo de vid y 12% (138.6 Has) para el de olivo; por otra parte, el suelo en descanso a disminuido en un 5% (181 Has), así como el cultivo de otros productos han disminuido en un 24% (96 Has) (Tabla V y Figura 9), por lo tanto existen cambios en el uso o tipo de cultivo de las parcelas en cada año (Tabla III), estos cambios implican aumento y/o disminución en los tipos de cultivo a potencializar, esto explica que no se incrementó el área del uso de suelo agrícola y continúe el fuerte crecimiento de casas vinícolas, a pesar de las extremas condiciones de sequía en la región que se explican más adelante.

Tabla V. Cambio en la cobertura por tipo de cultivo del Valle de Guadalupe en los últimos 4 años.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

Uso	Cambio (Ha)	Total (Ha)
Vid	+ 66.4	205
Olivo	+ 138.6	
Otros	- 96	205
Descanso	-181	

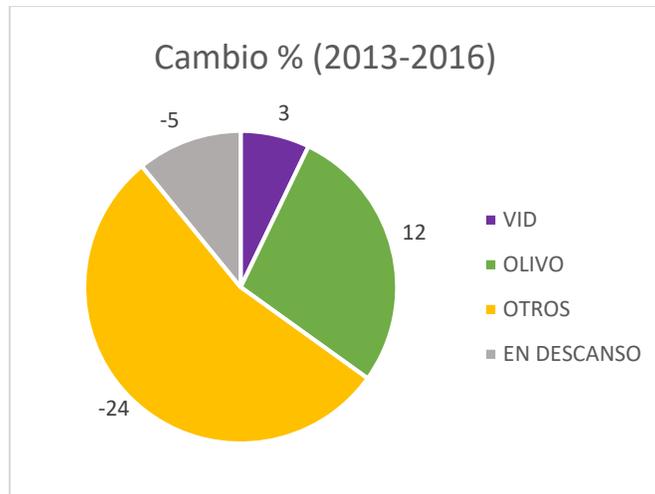


Figura 9. Porcentaje de cambio en la cobertura para cada tipo de cultivo del 2013 al 2016.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

Se puede apreciar (Tabla VI) que hubo un crecimiento total de 66.4 Has durante el periodo 2013-2016, donde se presentó un acelerado crecimiento de 29.5 Has (44.42 %) y 3 casas vinícolas en el periodo 2013-2014, se observa también (Figura 10) que este no se da en nuevas áreas de cultivo, se realiza sobre las áreas agrícolas en descanso.

Tabla VI. Cambios en el cultivo de la vid entre 2013-2016.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

	VID				TOTAL
	2013	2014	2015	2016	
Has	2,093.7	2,123.2	2,137.1	2,160.1	
Aumento (Has)	-	29.5	13.9	23	66.4
%	-	44.4	21	34.6	100

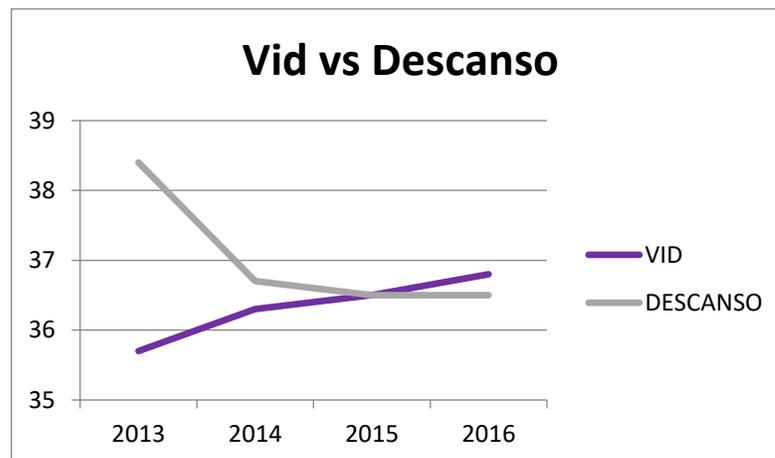


Figura 10. Comparación de cambio en % entre Vid y suelo en descanso, durante los últimos 3 años; se observa un comportamiento inverso. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

El análisis de SPI (Figura 11), realizado con los registros de precipitación de 68 años para el Valle de Guadalupe, muestra el periodo más seco de toda la serie, en 2014 con un valor de -2.27, la cual se clasifica como sequía extrema (Mckee, 1993).

Comparando el periodo de mayor crecimiento del cultivo de Vid (Figura 10), y los datos de SPI (Figura 11), coinciden con la peor sequía registrada en 68 años en la zona de estudio, este resultado sobresale por su incongruencia tanto con el acelerado crecimiento del cultivo de vid así como el aumento de casas vinícolas (Tabla IV), sin embargo, es evidente que este aumento se sustenta en actividades de riego.

El agua utilizada para las actividades de riego agrícola es extraída del acuífero Guadalupe, el cual se encuentra sobre explotado, con un déficit de -12.213155 Mm³ (COANGUA, 2015) y desde el 15 mayo de 1965, fue declarado en veda tipo III, es decir, que solo se permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Según datos publicados por REPDA en 2014 (Armenta, 2015), este acuífero tiene un volumen concesionado de 36.98 Mm³, de los cuales el 57.12% es de uso agrícola (21,121,853 m³) y 25.25% es de uso múltiple (9,336,269m³), ambos tipos de usos son utilizados para las actividades de riego. Los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el Valle de Guadalupe son: para el cultivo de olivo de 6000 m³/ha al año y para el cultivo de la vid de 5000 m³/ha al año, por lo tanto, se requerirían aproximadamente 7,572,000 m³ de agua al año para el cultivo de olivo y 10,800,500 m³ de agua al año para el cultivo de la vid, la suma de ambos requerimientos deja disponible 2,749353 m³ del uso agrícola al año para el mantenimiento de otros cultivos, esto deja integro el volumen de uso múltiple, para cubrir otras necesidades de las casas vinícolas o para el soporte del cultivo de otros productos. Si bien el volumen de agua concesionada sería suficiente para mantener los cultivos, lo datos muestra un escenario muy diferente debido a la sequía persistente de los últimos 7 años, lo que no permite la adecuada recarga del acuífero, sobresale el año 2014 con los valores más bajos de SPI en 68 años (Figura 11).

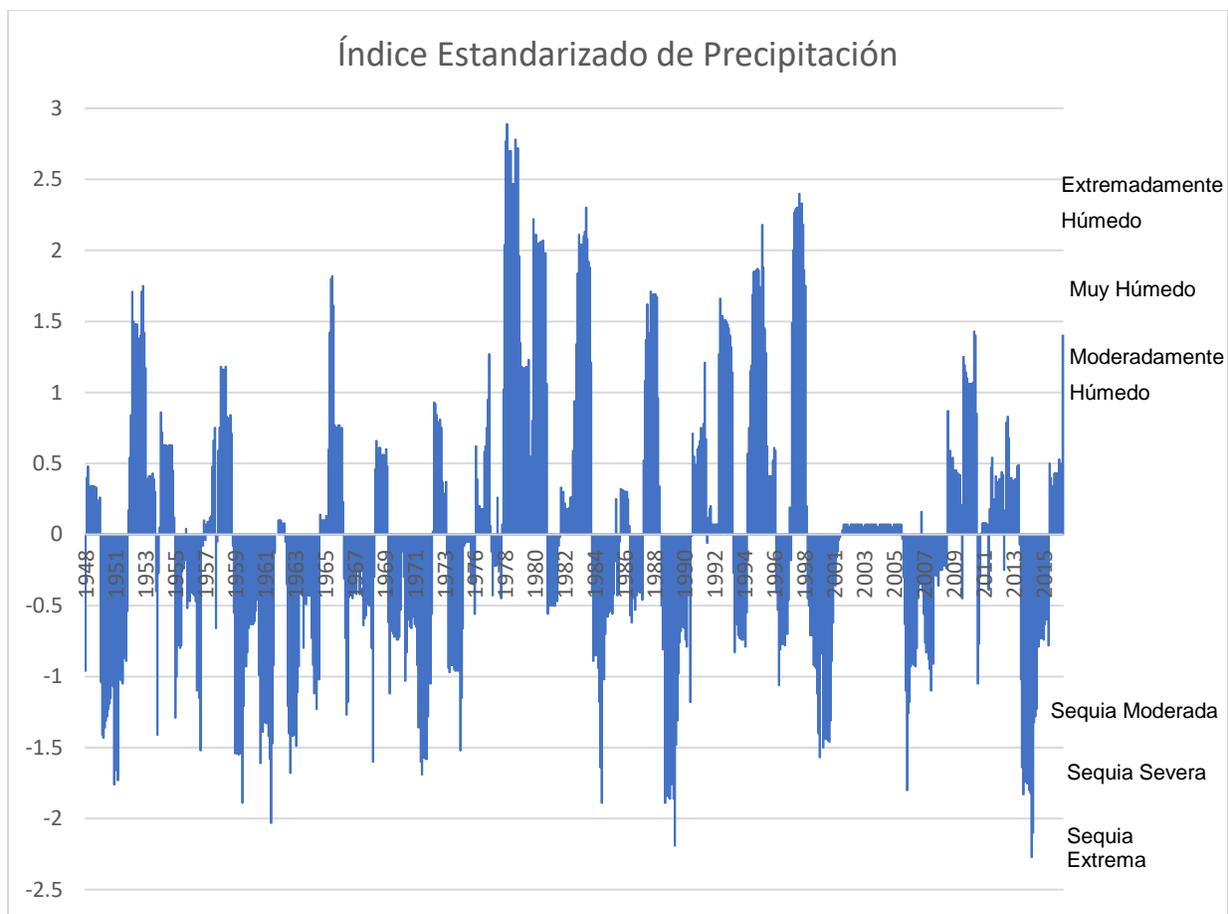


Figura 11. Serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación de 1948 a 2016.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA.

Por otra parte, en la Figura 11 se observa que los siete valores más bajos (De -1.86 a -2.27) se presentaron en los meses de octubre, noviembre y diciembre coincidiendo con la temporada de lluvias, indicando sequía severa y extrema. La sequía extrema se presentó en 1961, 1989 y 2014, siendo este último año el más seco con dos de los valores más bajos -2.27 en octubre y -2.1 en noviembre (Tabla VII).

Tabla VII. Valores de SPI más bajos durante la temporada de lluvias del periodo 1968-2016.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgado por CONAGUA.

SPI	Años	Meses	Sequia
-2.27	2014	10	Extrema
-2.19	1989	12	Extrema
-2.1	2014	11	Extrema
-2.03	1961	11	Extrema
-1.89	1959	11	Severa
-1.89	1984	11	Severa
-1.86	1989	11	Severa

Se extrajeron los valores de SPI anual correspondientes a la última década (Figura 12), donde se observa que los periodos secos son persistentes, iniciando con una sequía severa en 2006, y solamente el año 2010 alcanzó precipitaciones importantes que lo clasifican como un año moderadamente húmedo, es importante mencionar que los años con valores de 0 a +1 se consideran periodos de humedad normal, es decir, se presentan precipitaciones pero no son importantes, y en el caso de los años con valores de 0 a -1 se consideran periodos secos normales, sin llegar a sequía. En 2014 se presenta una sequía que va de severa a extrema, condición que se mantiene hasta 2015, donde se recupera alcanzando sequia moderada para después entrar en un periodo seco normal durante 2016.

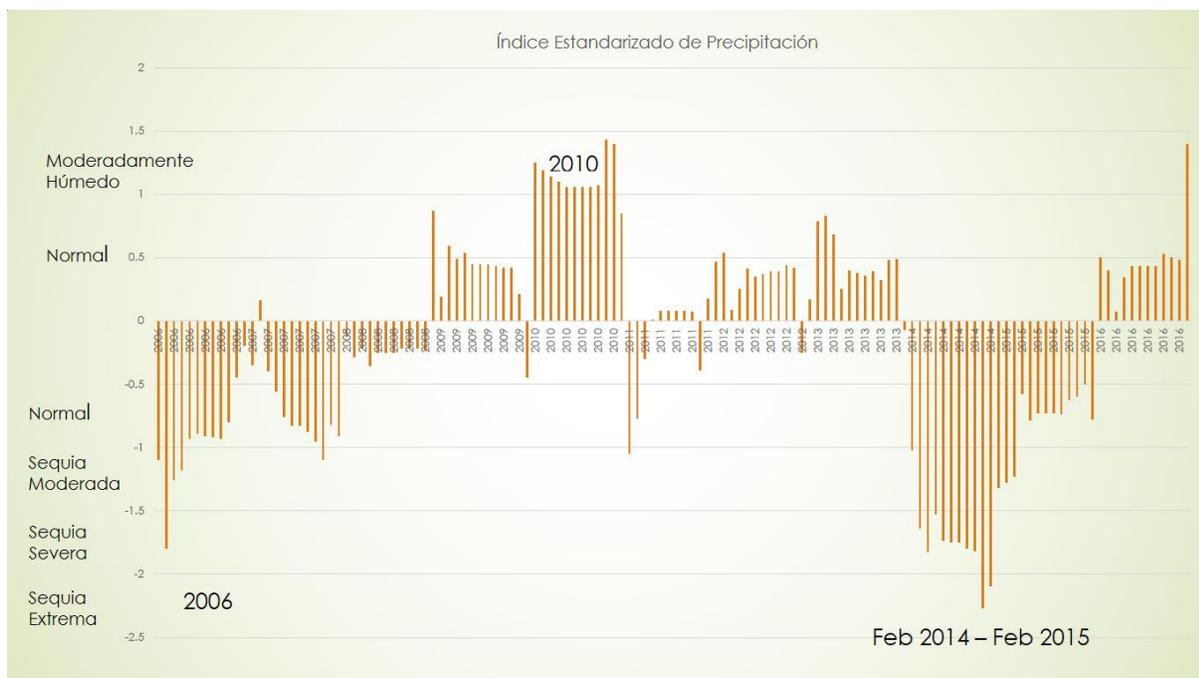


Figura 12. Extracción de la última década a partir de la serie de tiempo del Índice de precipitación estandarizado. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA.

El NDVI es un índice que evalúa el verdor vegetal de cualquier tipo de planta en un escala de 0 a 1, donde 0 representa la planta seca (ausencia de pigmento y mesófilo esponjoso) y 1 el mayor verdor, sin embargo, cada especie de planta presenta un valor típico de NDVI, ya sea por su estado fenológico o por la naturaleza de la misma, presentando un valor máximo que no necesariamente es 1, por lo tanto podemos estimar los valores mínimo y máximo durante el ciclo fenológico de determinada especie de

planta, como lo reporta Luna-Toledo en 2016, quien evaluó la respuesta de dos especies de olivo cultivadas en Argentina durante un año, los valores de NDVI fluctuaron de 0.3 a 0.6, reporta también valores de NDVI para Vid de 0.3 a 0.65, como se puede apreciar los rangos entre cultivos no tienen diferencias significativas; tomando como referencia este estudio se generaron los valores de NDVI para las especies cultivadas de vid y olivo en el Valle de Guadalupe, durante el año 2010, ya que este año fue clasificado en la escala de Mckee como un año moderadamente húmedo (Figura 12), dicho de otra manera, se determinó la respuesta de NDVI promedio para vid y olivo en condiciones de lluvia moderada (Figura 13), se observa que durante el invierno y principios de primavera se obtienen los valores más altos, es decir se presenta el mayor verdor en respuesta directa al periodo de lluvias, por otra parte en verano el NDVI baja presentando los valores mínimos en ambos cultivos; es probable que la baja precipitación típica de este periodo y las actividades de cosecha de la vid (vendimia) sean la respuesta a este comportamiento (Figura 14 y Figura 15).

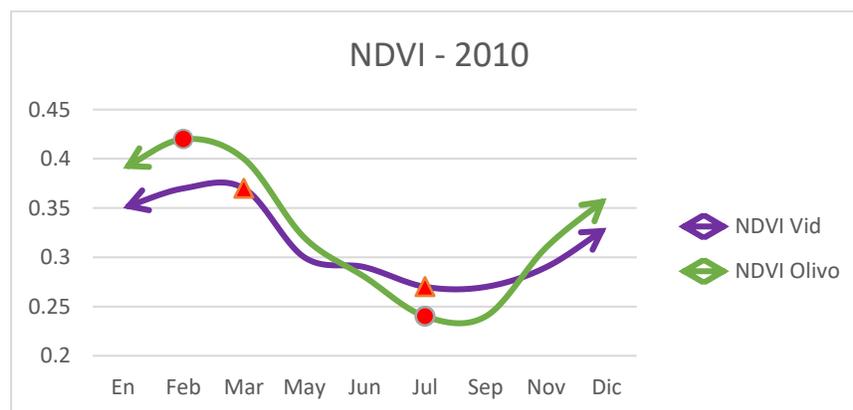


Figura 13. Comportamiento de NDVI promedio para Vid y Olivo durante un año húmedo en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de valores de NDVI calculados para la vid fue de 0.27 a 0.37, y para el olivo fue de 0.42 a 0.24 (Tabla VIII), estos valores son muy distintos a los encontrados por Luna-Toledo en Argentina; Él calculo que la vid y olivo no varían entre si sus valores presentando un rango para ambos cultivos de máximo 0.6, mínimo 0.3, el valor mínimo que se reporta para Argentina, en el Valle de Guadalupe representa un NDVI alto, estas enormes diferencias, se deben a los tipos de variedades que fueron evaluados pero principalmente a las características ambientales de la zonas de estudios, aunque ambas son zonas mediterráneas, Argentina cuenta con el aporte constante del agua de deshielo

que mantiene la humedad del suelo y en buen estado los acuíferos utilizados para uso agrícola, una situación completamente opuesta a lo que se vive en VG. Considerando los resultados de NDVI promedio obtenidos para 2010 se generó una escala de clasificación para evaluar los meses correspondientes a primavera y verano del periodo 2006-2016 (

Tabla IX).

*Tabla VIII. Valores NDVI obtenidos para los cultivos en 2010.
Fuente: Elaboración propia*

Mes	NDVI total	NDVI Vid	NDVI Olivo
En	0.38	0.35	0.39
Feb	0.39	0.37	0.42
Mar	0.39	0.37	0.40
May	0.34	0.30	0.32
Jun	0.29	0.29	0.28
Jul	0.27	0.27	0.24
Ago	0.31	0.30	0.26
Sep	0.3	0.27	0.24
Nov	0.32	0.29	0.31
Dic	0.34	0.33	0.36

*Tabla IX. Clasificación generada para los cultivos de VG durante primavera y verano.
Fuente: Elaboración propia*

Rango	Clasificación
0.20 a 0.25	Bajo
0.25 a 0.30	Medio
>0.30	Alto

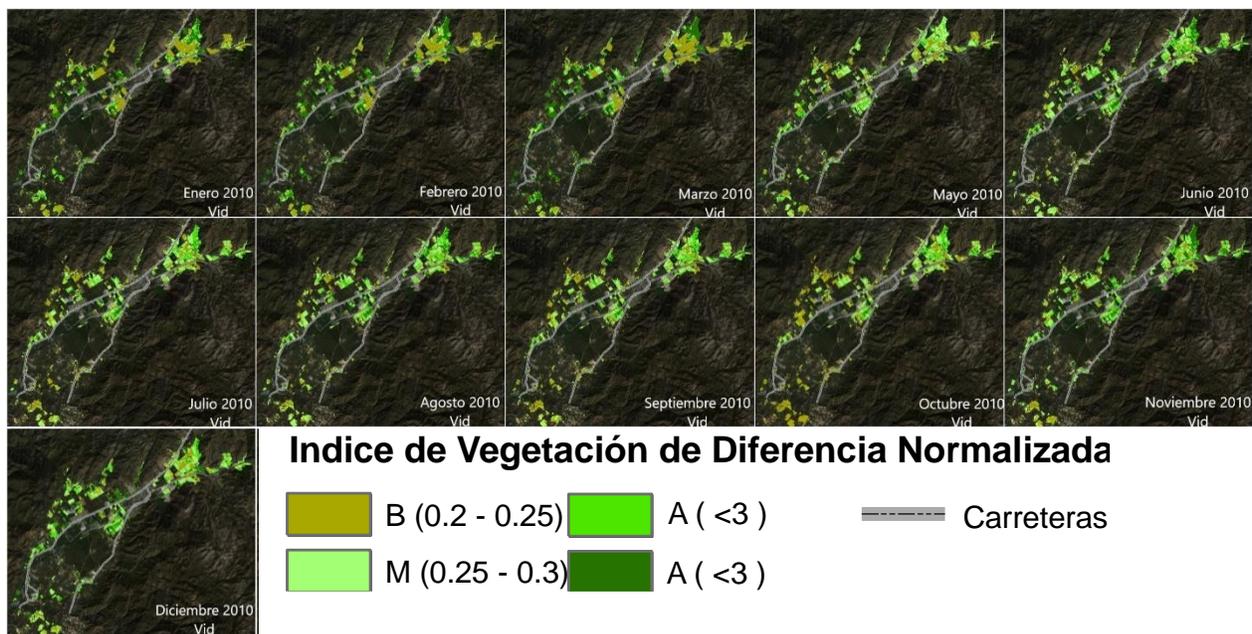


Figura 14. Serie de tiempo mensual del comportamiento del NDVI del cultivo de Vid, durante 2010. Fuente: Elaboración propia

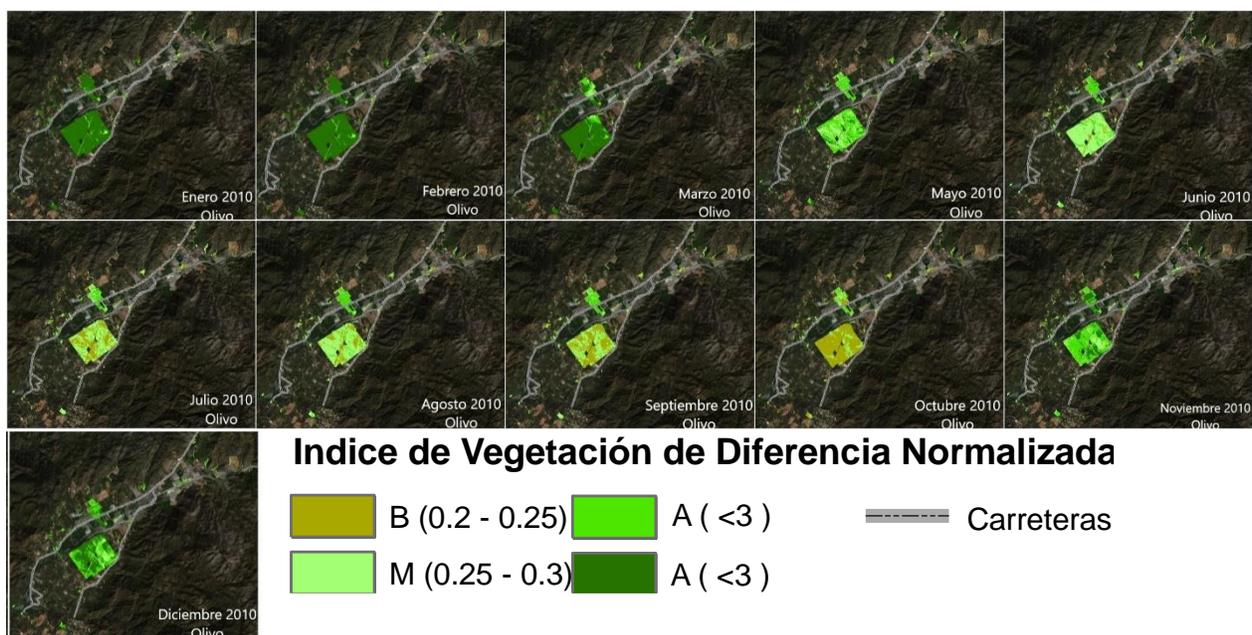
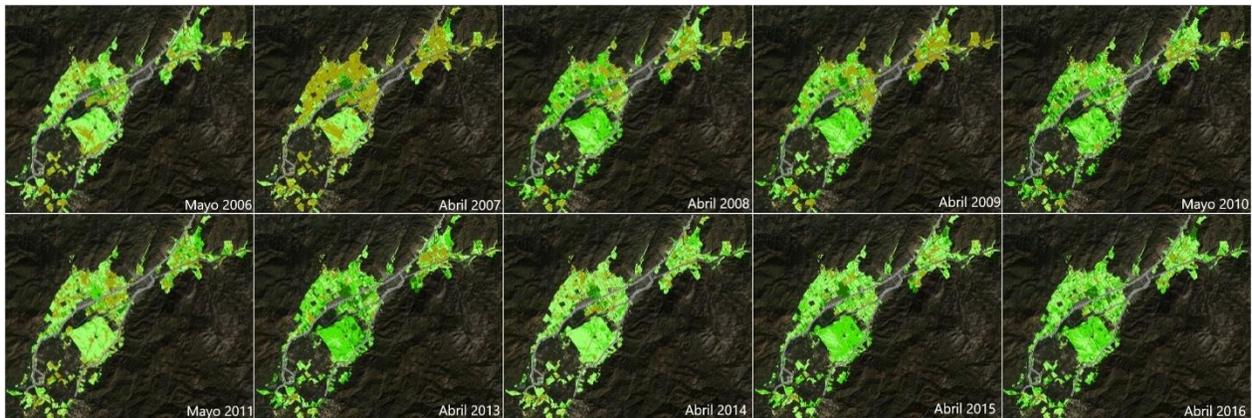


Figura 15. Serie de tiempo mensual del comportamiento del NDVI del cultivo de Olivo, durante 2010. Fuente: Elaboración propia.

Se analizaron dos imágenes por año del periodo 2006-2016, cada una representativa de primavera y verano, a partir de estas se calcularon valores NDVI promedio para el uso de suelo agrícola total ($NDVI_T$) (Figura 16 y Figura 18) y para el suelo cultivado con vid y olivo ($NDVI_{v-o}$) (Figura 17 y Figura 19), no se encontraron

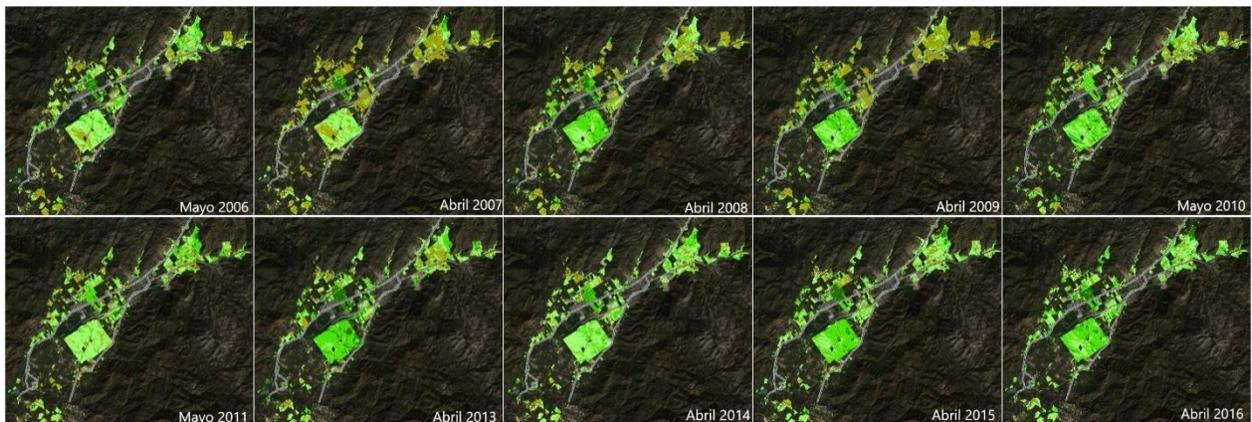
diferencias importantes entre ellas, esto se debe a que el suelo cultivado con vid-olivo representa el 92% del suelo cultivado y las parcelas destinadas a otros cultivos solo representan el 8%, además el suelo en descanso no aporta valores significativos de NDVI (~ 0.01), la vegetación silvestre que llega a cubrir esta área es mínima, debido al prolongado periodo de sequía, estas plantas responden directamente a la precipitación, no reciben riego.



Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada



Figura 16. Representación de $NDVI_T$ promedio del uso de suelo agrícola durante la primavera de la última década. Fuente: Elaboración propia



Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada

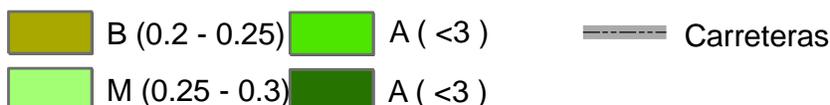
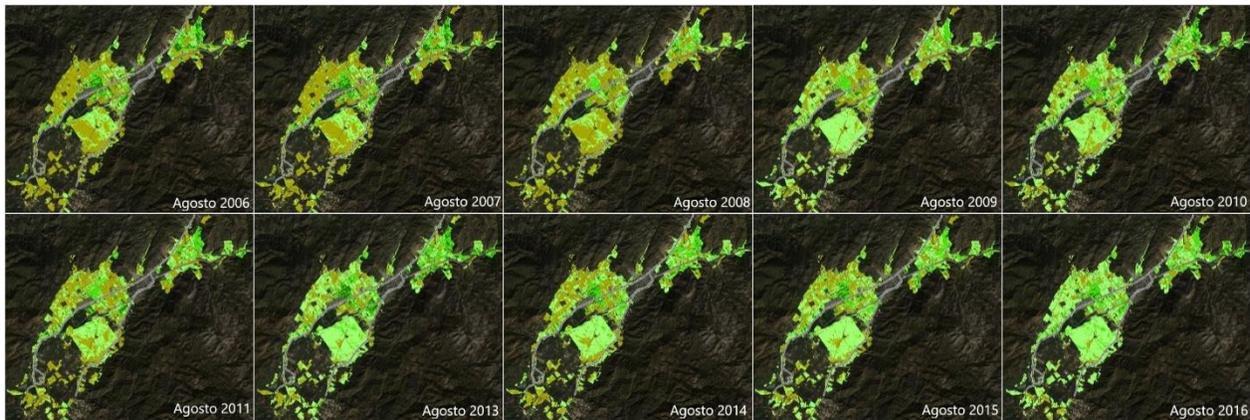


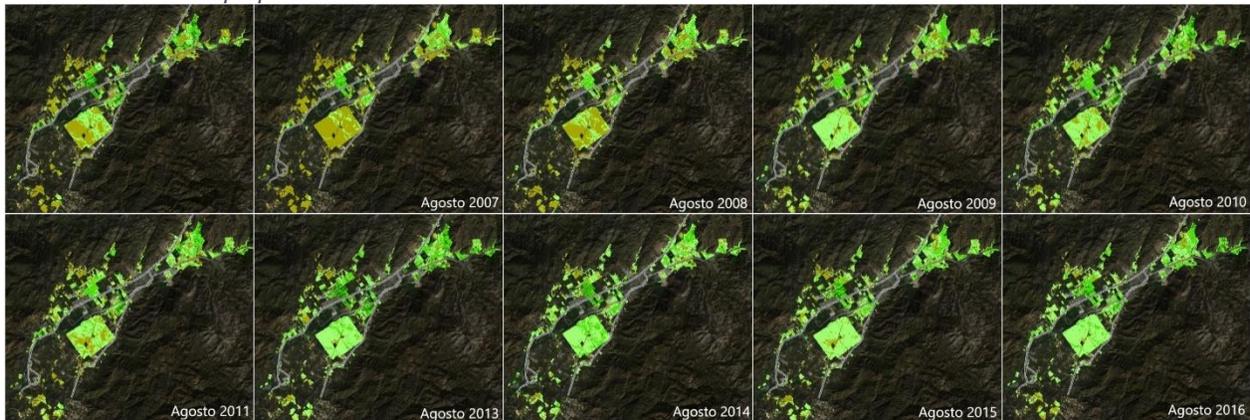
Figura 17. Representación de $NDVI_{v-o}$ correspondiente a cultivos de Vid y Olivo durante la primavera de la última década. Fuente: Elaboración propia.



Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada



Figura 18. Representación de NDVIT promedio del uso de suelo agrícola durante el verano de la última década. Fuente: Elaboración propia



Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada



Figura 19. Representación de NDVI_{V-O} correspondiente a cultivos de Vid y Olivo durante el verano de la última década. Fuente: Elaboración propia.

En ambos casos se observó que los valores de NDVI promedio son mayores en primavera con respecto a los obtenidos para verano (Figura 20), esto es por la respuesta vegetal a las lluvias de invierno.

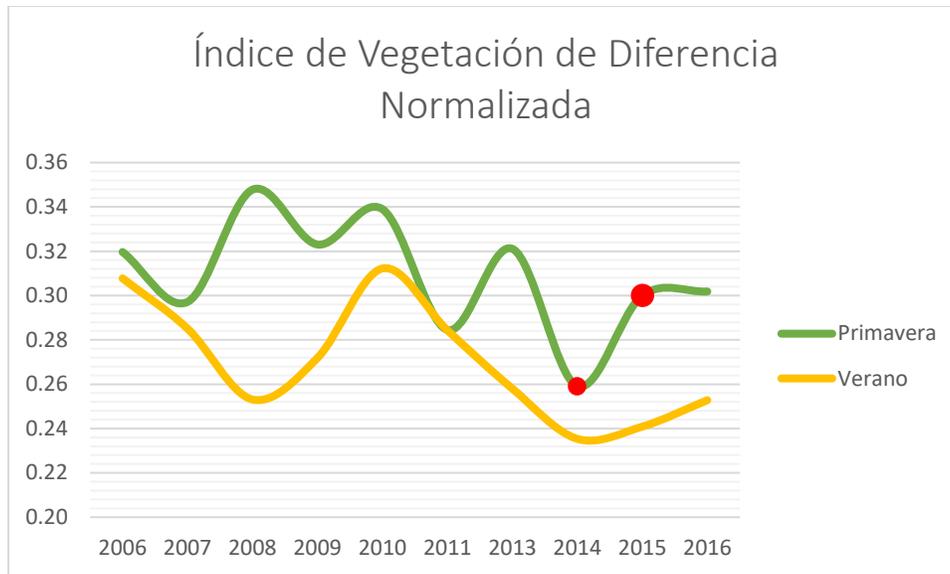


Figura 20. Comportamiento de $NDVI_T$ promedio del uso de suelo agrícola del VG durante la última década.
Fuente: Elaboración propia.

El valor máximo de NDVI promedio del uso agrícola en primavera fue de 0.35 (Alto) y el valor máximo de NDVI promedio para verano de 0.31 (Alto). El valor mínimo de NDVI promedio del uso agrícola en ambas estaciones coinciden en el año 2014; para primavera se calculó 0.26 (Medio) y para verano 0.24 (Bajo) (Tabla X).

En la Figura 20 los puntos rojos indican un fuerte cambio en el valor de NDVI, para 2014 se calculó 0.26 (Medio) y para 2015 0.30 (Alto). En 2014 las condiciones del Valle de Guadalupe llegan a sequía severa en el mes de abril y el NDVI promedio correspondiente disminuye hasta 0.26 siendo el valor más bajo de la década, aquí se presenta una alta correlación entre los índices, sin embargo, en el 2015 se mantiene la sequía en condición moderada para después tornarse condición normal seco, esto implicaría que se mantuviese constante o en descenso el valor de NDVI, pero esto no sucedió, ya que el NDVI aumenta considerablemente de nivel medio en 2014 a nivel alto en 2015, esto es una evidencia del efecto del riego en el NDVI sobre el impacto que pudiese tener la sequía meteorológica que se vive en el Valle de Guadalupe.

Tabla X. Datos NDVI τ promedio para el periodo 2006-2016, clasificados según la propuesta generada para VG.
Fuente: elaboración propia.

Año	NDVI τ	
	Primavera	Verano
2006	0.32 ALTO	0.31 ALTO
2007	0.3 ALTO	0.29 MEDIO
2008	0.35 ALTO	0.25 MEDIO
2009	0.32 ALTO	0.27 MEDIO
2010	0.34 ALTO	0.31 ALTO
2011	0.28 MEDIO	0.28 MEDIO
2013	0.32 ALTO	0.26 MEDIO
2014	0.26 MEDIO	0.24 BAJO
2015	0.3 ALTO	0.24 BAJO
2016	0.3 ALTO	0.25 MEDIO

Se tomaron los valores promedio de NDVI τ correspondientes a la estación de primavera (Abril/Mayo), por ser las imágenes analizadas que mejor representan la respuesta de la vegetación a la temporada de lluvia y se compararon con los valores de SPI correspondientes al mes anterior (Marzo/Abril) (Figura 21), esto, con base en el trabajo de Dutta en 2013, donde menciona que el SPI de un mes anterior se correlaciona mejor con el NDVI de un mes determinado, debido al proceso de asimilación y aprovechamiento del agua en el sistema de la planta, el efecto tarda en verse reflejado en el verdor de la planta aproximadamente entre 3 y 4 semanas.

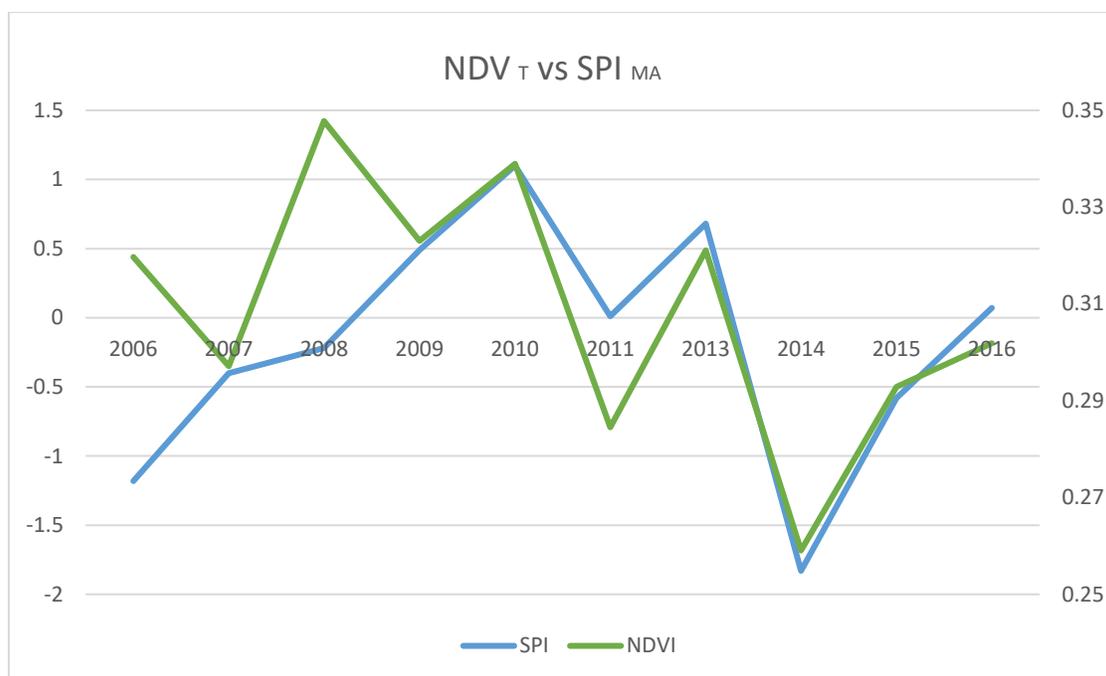


Figura 21. Fluctuaciones de NDVI promedio del suelo agrícola contrastando con SPI. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla XI y Figura 21, se observa que en la mayoría de los años el NDVI es Alto, es decir, que los valores se encuentran por arriba de 0.3, independientemente del comportamiento de SPI, esto evidencia que los cultivos se mantienen gracias a las actividades de riego, excepto en 2014 donde el NDVI fue Medio (0.26) y el SPI indica condiciones severamente secas, lo cual afecto la disponibilidad de agua para las actividades de riego.

Tabla XI. Datos de NDVI y SPI correspondientes a primavera del periodo 2006-2016 clasificados según las escalas correspondientes. Fuente: Elaboración propia.

AÑO	NDVI _T (ABRIL/MAYO)		SPI _{MA} (MARZO/ABRIL)	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
2006	0.32	Alto	-1.18	Moderadamente. seco
2007	0.30	Alto	-0.4	Normal seco
2008	0.35	Alto	-0.22	Normal seco
2009	0.32	Alto	0.49	Normal húmedo
2010	0.34	Alto	1.1	Moderadamente húmedo
2011	0.28	Medio	0.01	Normal húmedo
2013	0.32	Alto	0.68	Normal húmedo
2014	0.26	Medio	-1.83	Severamente seco
2015	0.29	Alto	-0.58	Normal seco
2016	0.30	Medio	0.07	Normal húmedo

6. Conclusión

El año 2014 fue el más seco de la última década, presenta un valor de SPI de -2.27 clasificándose con sequía extrema, en este mismo año se aumentaron 29.5 Has de cultivo de vid y 117 de olivo, también se instalaron 3 casas vinícolas más. Estos aumentos no implicaron cambios de uso de suelo, ya que se instalaron sobre suelo agrícola en descanso.

La sequía más severa de la última década dio inicio en enero de 2014 y se prolongó hasta febrero de 2015; se analizaron los valores de NDVI y en 2014 se obtuvo 0.26 (Nivel Bajo) y en 2015 0.30 (Nivel Medio), este cambio representa una importante recuperación del vigor vegetal, resultado del riego.

Si las sequías se mantienen con la misma intensidad eventualmente el uso del agua del acuífero se verá en un fuerte conflicto de interés, entre el uso agrícola y el uso doméstico y de servicios. En el programa sectorial de desarrollo urbano – turístico de los valles vitivinícolas se considera como estrategia la compra de derechos de agua de otras cuencas, así como propiciar mayor reutilización del agua tratada y fomentar acciones tendientes a la recarga de los acuíferos, por lo tanto es posible que el agua actualmente utilizada para mantener las áreas agrícolas sea de otras cuencas, lo cual favorecería intereses económicos de productores, pero implicaría severos impactos ambientales como cambios en las características fisicoquímicas y biológicas de agua – suelo, así como la geomorfología de la cuenca.

La sequía no ha tenido efectos en la cobertura agrícola del Valle de Guadalupe; en este trabajo se observó que la sequía meteorológica no impacta directamente a la producción de la vegetación agrícola, contrario a lo que sucede con la vegetación silvestre, ya que se evita mediante el riego de apoyo, sin embargo, el acuífero del cual se extrae el agua para regar si depende de la precipitación para su recarga, entonces la sequía impacta la disponibilidad del agua para riego.

Al mediano plazo la sequía representa una limitante a la disponibilidad de agua en el acuífero, por lo tanto, la sequía es una limitante indirecta sobre la permanencia y desarrollo de la agricultura en el Valle de Guadalupe.

Se recomienda continuar y profundizar el estudio de la problemática abordada en este trabajo, específicamente se sugiere:

- Calcular valores mensuales de NDVI para el año 2014 por su condición de sequía extrema, y con ello caracterizar la respuesta de la agricultura del VG ante condiciones extremas de humedad (2010) y sequía (2014).
- Calcular el NDVI para los meses que presentaron los valores máximos y mínimos durante un año húmedo (2010) y un año seco (2014) para así evaluar el comportamiento real de los cultivos.
- Calcular la biomasa a partir de los datos generados en este trabajo.
- Determinar el error en los valores generados a partir de sensores remotos.
- Determinar la correlación entre SPI y NDVI por método estadístico.
- Contrastar los resultados obtenidos en este trabajo con valores de NDVI de vegetación natural.
- Determinar el impacto de la sequía agrícola a la productividad de VG.
- Corroborar el origen del agua utilizada para el riego.
- Incorporar el factor social en el conflicto de interés sobre los usos de agua

Los resultados obtenidos comprueban la percepción informal que se tiene sobre el acelerado desarrollo vinícola en el VG; el aumento de pequeñas casas vinícolas con pocas hectáreas de cultivo de fines estéticos, representa un consumo elevado de agua para riego, que, considerando la sequía persistente, es incongruente que los cultivos se incrementen incluso cuando los varietales sean de temporal o estos no representen un cambio en el uso del suelo. El VG no se encuentra a su máxima capacidad agrícola (57% del uso de suelos agrícola disponible) por que el acuífero y el número de concesiones no serían suficientes para mantenerlos cultivos por lo tanto la actividad agrícola está limitada por la disponibilidad de agua, es decir que la sequía meteorológica detectada empieza a convertirse en una sequía agrícola. Todo esto deriva en un conflicto de interés social por el uso concesionado de la poca agua disponible en el acuífero Guadalupe, principalmente por que los usos domésticos son los primeros en ser limitados, lo cual es un riesgo potencial a la salud pública, violentando los derechos fundamentales de los pobladores del área de estudio y zonas aledañas. Es de suma importancia verificar el origen del agua que se utiliza para mantener la agricultura del VG, así como estimar escenarios sobre qué sucedería si el área agrícola del VG es aprovechado a su máxima capacidad.

7. Bibliografía

1. Acuña, J. R., Llenque, J. C. E., Campos, E. R., & Juárez, R. N. modelo de predicción del inicio de la sequía en el Perú usando el índice de vegetación procedente de imágenes de satélite e índices el niño oscilación sur. *Revista de Investigación de Física*, 9(02).
2. Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en investigación agropecuaria*, 14(2).
3. Armenta-Pérez (2015) Diagnóstico integral del acuífero Guadalupe y recomendaciones para la implementación de reglas operativas de apropiación. Trabajo terminal Especialidad.
4. Asbjornsen, H., Vogt, K. A., & Ashton, M. S. (2004). Synergistic responses of oak, pine and shrub seedlings to edge environments and drought in a fragmented tropical highland oak forest, Oaxaca, Mexico. *Forest ecology and management*, 192(2), 313-334.
5. Bavestrello-Riquelme, C., Cavieres, L., Gallardo, J., Ibacache, A., Franck, N., & Zurita-Silva, A. (2012). Evaluación de la tolerancia a estrés por sequía en cuatro genotipos naturalizados de vid (*Vitis vinifera*) provenientes del norte de Chile. *Idesia (Arica)*, 30(3), 83-92.
6. Bernal, R. (2001). Las sequías: Desastres considerados como pequeños pero grandes en su importancia. In *EIRD Informa: Revista para América Latina y el Caribe* (Vol. 4, pp. 17-9). NU. Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD).
7. Bringas Rábago, & Nora L. (Coord.) (2014b). "Inventario de establecimientos turísticos en el Valle de Guadalupe", Tijuana, Reporte de investigación, El Colegio de la Frontera Norte (COLEF)-Secretaría de Turismo del Estado de Baja California (SECTURE).
8. Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
9. Chuai, X. W., Huang, X. J., Wang, W. J., & Bao, G. (2013). NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1696-1706.
10. Chuvieco, E. (1998). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 59, 135
11. CONAGUA (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Baja California y Municipio de San Luis Río Colorado.Sonora. 1a. versión.
12. CONAGUA, S. (2012). Atlas del Agua en México 2014.
13. CONAGUA (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207) estado de Baja California.

14. Comisión Nacional de Riego de Chile, (2000). Estimación de la demanda de agua en los cultivos. Gobierno Regional de Coquimbo.
15. Dutta, D., Kundu, A., & Patel, N. R. (2013). Predicting agricultural drought in eastern Rajasthan of India using NDVI and standardized precipitation index. *Geocarto International*, 28(3), 192-209.
16. Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S., & Reichstein, M. (2013). Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113-2144.
17. Gaeta Lara, A. (2006). Productividad de la vid en función del aprovechamiento de agua subterránea en el Valle de Guadalupe 1994-2004. MPA Thesis. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, México.
18. García-Cervigón, D., & José, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión.
19. García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Sabater, N., Belda, F., Moreno, A., Gilabert, M. A., ... & Meliá, J. (2014). Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España.
20. García, S. G., Baille, A., González, M. M., Martínez, V., Urrea, M., Hernández, Z., ... & Tanguy, M. (2007). Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS. *Teledetección-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Buenos Aires: Ed. Martin, 223-229.
21. Gomis, J. G. Manejo de riego de vides para vino en España. Seminario Internacional Manejo de riego y suelo en vides para vino y mesa. Serie actas INIA N°39
22. González Andrade, S., & Flores, N. A. F. (2013). Matriz de insumo-producto vitivinícola de Baja California, México. *Revista de economía*, 30(81), 57-88.
23. GloVis portal (<http://glovis.usgs.gov>) Earth Resources Observation and Science Center (EROS) of the United States Geological Survey (USGS)
24. Hallack- Alegría, M. (2011) Análisis de frecuencias de precipitación por la metodología de L-momentos y sus efectos en la cuenca del arroyo de Guadalupe, Baja California, México. Tesis Doctoral. Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California.
25. Hallack-Alegria, M., & Watkins, Jr, D. W. (2005). Drought frequency analysis and prediction in Sonora, México. In *Impacts of Global Climate Change* (pp. 1-9).
26. Havris, L. E., & Stan, D. (2015). IMPACTS OF DRYNESS AND DROUGHT PHENOMENA ON AGRICULTURAL LANDSCAPE IN THE TITU PLAIN. *Aerul si Apa*. Componente ale Mediului, 307.
27. Heuvelink, G. B. M., & van Egmond, F. M. (2010). Space–Time Geostatistics for Precision Agriculture: A Case Study of NDVI Mapping for a Dutch Potato Field. In *Geostatistical applications for precision agriculture* (pp. 117-137). Springer Netherlands.

28. Jiménez, N., Gavilá, J. M., & Rodríguez, I. C. (2010). Evaluación del impacto de la sequía sobre la vegetación natural mediante teledetección en el SE español.
29. Łabędzki, L. (2007). Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index SPI. *Irrigation and Drainage*, 56(1), 67-77.
- Luna Toledo, E. S., & Figuerola, P. I. Monitoreo de la fenología y fenometría del olivar a través de la dinámica del NDVI-modis, en Vichigasta, La Rioja.
30. Madrigal, J.M. (s.a.). Análisis de anomalías de verdor y métricas fenológicas en cultivos y pastizales del norte de la República Mexicana. Variabilidad Climática: variables biofísicas y climáticas relacionadas. Plataforma Geoweb para la red de desarrollo en sustentabilidad alimentaria del CONACYT.
31. Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A. (2016). Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management*, 175, 29-42.
32. Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). Washington, DC, USA: US Department of Commerce. *Weather Bureau*.
33. Periódico Oficial del Estado, No. 40, 29 de septiembre de 2006, Tomo CXIII. Programa sectorial de desarrollo urbano -turístico de los valles vitivinícolas de la zona norte del municipio de Ensenada (región del vino), B.C. Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (IMIP).
34. Reyes-Coca, S., & Troncoso-Gaytán, R. (2004). Modulación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California. *Ciencias marinas*, 30(1A), 99-108.
- Rodríguez-Rey Martín, C. (2009). Viticultura de precisión y Teledetección: relación entre índices de reflectancia espectral y parámetros de vigor en parcelas de viñedo de la variedad Chardonnay.
35. Ruiz, L. M., Martínez, J. A. V., & Radillo, S. E. M. La Ruta del Vino en el Valle de Guadalupe, Baja California, México. Perspectiva frente al cambio climático: Una primera aproximación.
36. Ruiz, e. R. P. Análisis de la dinámica temporal de la cobertura vegetal y su relación con la variabilidad en la precipitación en el municipio de Juárez, chihuahua.
37. Sánchez & Gándara, A. (2011). *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable*. México: S y G Editores S.A. de C.V.
38. Sánchez Zepeda, L. (2007). *Aproximación a la incidencia de la industria vinícola en el desarrollo económico del valle de Guadalupe (México) y la Manchuela (España)* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral accesible a texto completo en <http://www.eumed.net/tesis/2007/lasz>).
39. SECTURBC portal (<https://www.descubrebajacalifornia.com/index.php/vinedos-y-vincolas/5>) Viñedos en la Ruta Central del Vino.
40. SEDESOL (2006). Programa de desarrollo regional. Región del vino.
41. Towers, P. (2009). Guía de mapeo de variabilidad de vid con NDVI. AgriSat. www.agrisat-sa.com.ar/wp-content/uploads/2016/05/mapeo-ndvi-vid-web.pdf

42. Vicente-Serrano, S. M. (2004). Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales. *Unpublished PhD dissertation, Universidad de Zaragoza.*
43. Wardlow, B. D., Anderson, M. C., & Verdin, J. P. (Eds.). (2012). *Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches.* CRC Press.
44. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international, 10*(3), 111-120.
45. Zhang, J. (2016, April). A framework for developing an impact-oriented agricultural drought monitoring system from remote sensing. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 18, p. 16027).

8. Anexos

Anexo 1. Antecedentes en Diagrama de Sistemas complejo

Seguimiento en la cobertura de uso agrícola del VG

CAUSAS

-Incremento del riego por varietales de mayor requerimiento hídrico.

-Demandas del mercado

PROBLEMA

Se desconoce cómo los cambios en la condición de precipitación influyen en la permanencia de las actividades agrícolas y vinícolas

CONSECUENCIAS

Búsqueda de alternativas para riego de otras cuencas /

Gaeta-Lara,
2006

Gándara, 2011

CONAGUA

Ecología

Municipal

IMIP

Productores

Pobladores

Usuarios

externos

Anexo 2. Diagrama de Flujo Metodología cálculo de NDVI

Landsat 5

Banda 3 (R)
Banda 4 (IRC)

Parámetros para corrección radiométrica

-Metadato:

Radiance_max (RMAX)

Radiance_min (RMIN)

Quantize_cal_max (QCALMAX)

Quantize_cal_min (QCALMIN)

Sun_elevation (θ)

-Chander (2009)

Earth sun distance (d)

ESUN

Landsat 8

Banda 4 (R)
Banda 5 (IRC)

Parámetros para corrección radiométrica

-Metadato:

Reflectance multiband (Rm)

Reflectance add band (Rab)

Ecuaciones corrección radiométrica

(Chander, 2009)

-De valor digital a reflectancia TOA

$$L = [(Rm) * (Banda)] + Rab$$

**Esta se ingresa en la calculadora raster (ArcMap 10.2), para cada banda.

Ecuaciones corrección radiométrica (Chander, 2009)

-De valor digital a radiancia

$$L = \left(\frac{RAD\ max - RAD\ min}{QCAL\ max - QCAL\ min} \right) (Banda - QCALmin) + Lmin$$

-De radiancia a reflectancia TOA

$$P = \frac{\pi L d^2}{ESUN \sin \theta}$$

**Estas se ingresan en la calculadora raster (ArcMap 10.2), para cada banda.

Cortar el área de estudio (microcuenca)
Arctoolbox>DataManagementTools>Raster>RasterProcessing>Clip

*Marcarla casilla Use input features for clipping geometry

Calcular Índice de vegetación de diferencia normalizada

$$NDVI = \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + Rojo)}$$

*Ingresar en calculadora raster: Float[IRC-R]/Float[IRC+R]

Float → indica que los valores se mantengan en decimales y no se redondeen

Selección del área agrícola

-Shape de parcelas (SEFOA, 2016) se transforma a raster, con misma resolución y tamaño.

ArcToolbox>ConversionTools>ToRaster>PolygonToRaster

*CellSize--> 30

**Environmental>ProcessingExtent>sameAsLayer
(microcuenca)

-Se reclasifican los valores de cada celda, de manera que dentro de los polígonos de las parcelas el valor sea 1 y fuera sea 0.

ArcToolbox>3DAnalysisTools>RasterClass>Reclassify

valores → 1 NotData → 0

-En calculadora raster multiplicar la imagen de NDVI por el raster de parcelas, de este modo se anularán los valores de NDVI correspondientes a vegetación natural, manteniendo solo los valores correspondientes a la vegetación agrícola, dentro de las parcelas.

Extraer tabla de valores NDVI

ArcMap solo crea tabla de atributos a imágenes raster si los valores de cada pixel son enteros, en este caso solo tenemos decimales, sin embargo, se convertirán en enteros:

-En calculadora raster se multiplicará la imagen NDVI en parcelas por 1 000 000, para obtener solo valores enteros.

Sin embargo, estos valores son floting y es necesario pasarlos a integer:

ArcToolbox>SpatialAnalysisTools>Math> Int

-Crear tabla de atributos:

ArcToolbox>DataManagementTools>Raster>RasterProperties>BuildRaster
AttributeTable

*Agregar una columna tipo float

**Field Calculator (sobre la columna creada), para calcular nuevamente el valor real de NDVI, es decir en decimales: Value*1 000 000

***Exportar a Excel → Como textfile

En Excel...

-Se calcula media aritmética y desviación estándar

-Grafica, serie de tiempo (años) de media aritmética de NDVI por mes

Datos de precipitación mensual acumulada de
CONAGUA estación 2036 Olivares Mexicanos

Programa SPI_SL_6 de NDMC

<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>

Formato de los datos, en archivo .txt:

En tres columnas sin encabezados, donde la primera columna es el año, la segunda es el mes y la tercera corresponde a los mm precipitados.

Aclaraciones:

*Solo admite números enteros

*Para ausencia de datos se usa -9900

*El año máximo que reconoce es 2000, por lo tanto, para este trabajo se restó 16 años al valor real.

Programa:

Pregunta en cuantas escalas de tiempo requieres el índice y le indicas cada cuanto; p.e. en 4 escalas, cada tres meses, cada seis meses, cada 12 meses y cada 24 meses. Por ultimo indicas la ruta del archivo .txt con los datos de precipitación y una ruta donde guardara los resultados; p.e.

```
Standardized Precipitation Index Calculator
Number of time scales: 4
timeScale1 3
timeScale2 6
timeScale3 12
timeScale4 24
Input file: C:\pre.txt
Output file: C:\spi.txt
```

El archivo txt que se obtiene del programa, se exporta a Excel donde sumamos a la columna de años, la cantidad de años que restamos antes (primera columna), y eliminamos los valores -9900. La segunda columna corresponde a los meses.

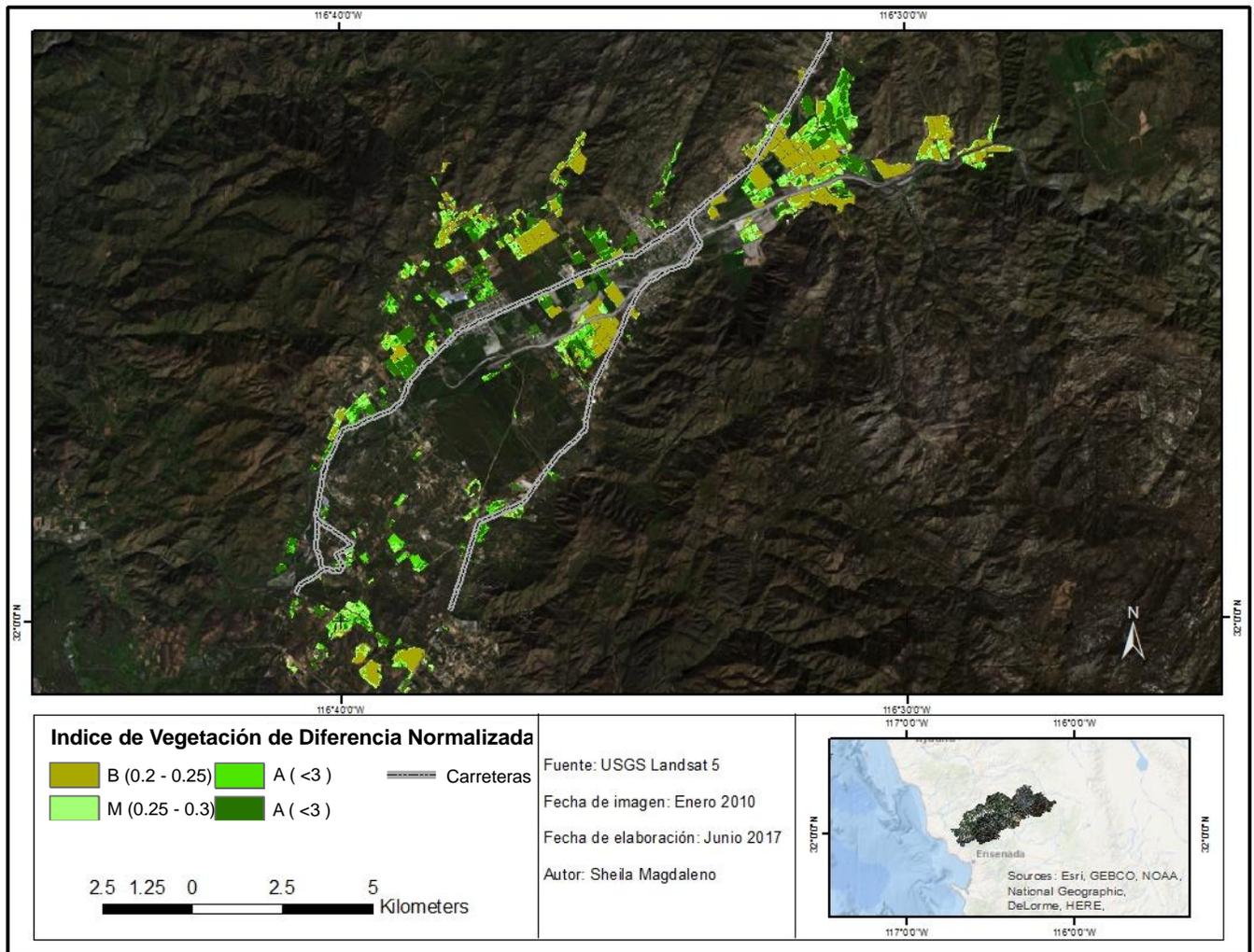
El número de columnas siguientes depende de los periodos que se solicitaron, en orden ascendente, es decir, la tercera columna corresponde a SPI cada 3 meses, en la cuarta a SPI cada 6 meses, la quinta cada 12 meses y la sexta columna cada 24 meses.

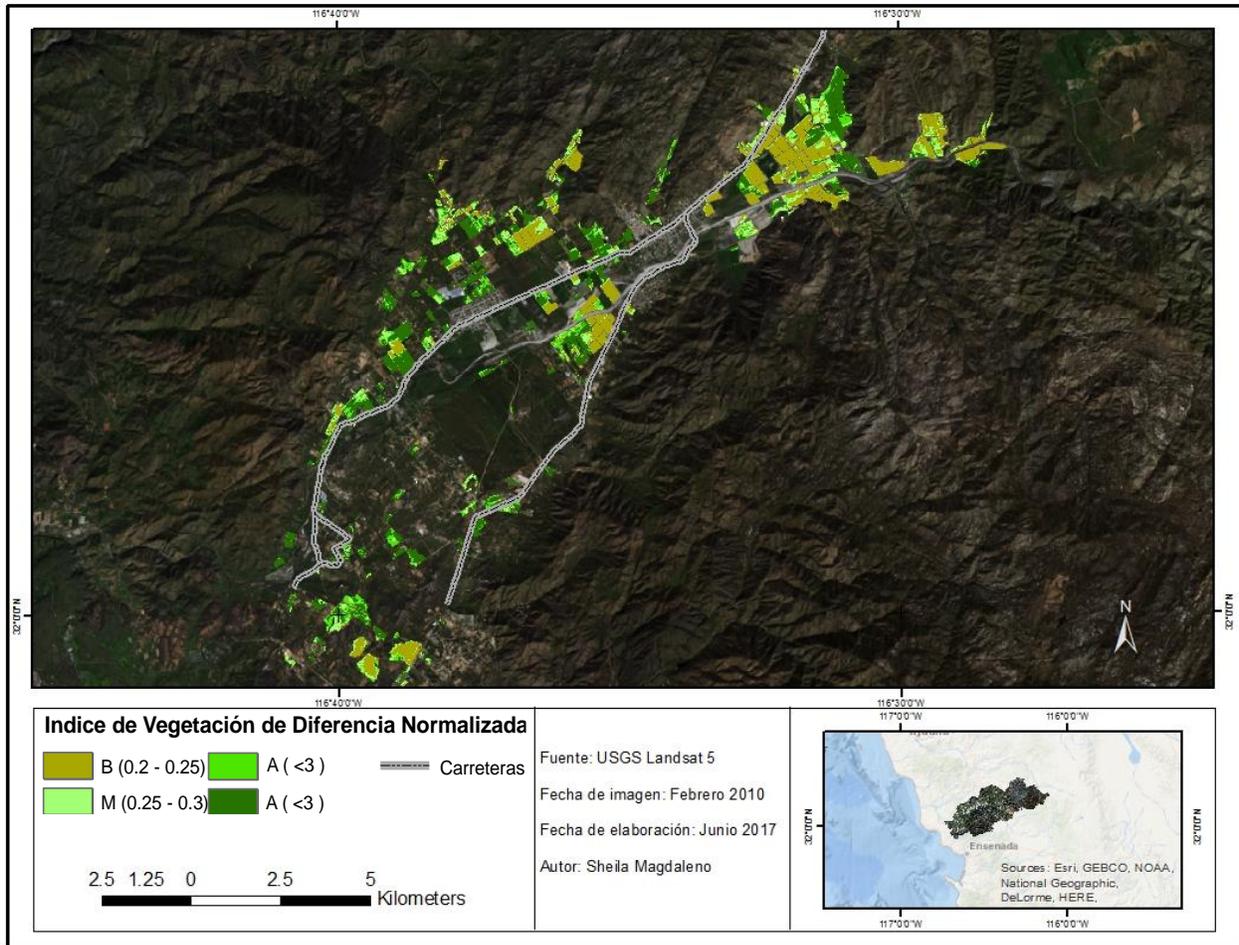
Podemos graficar los datos de SPI que nos interese, en el periodo de tiempo deseado.

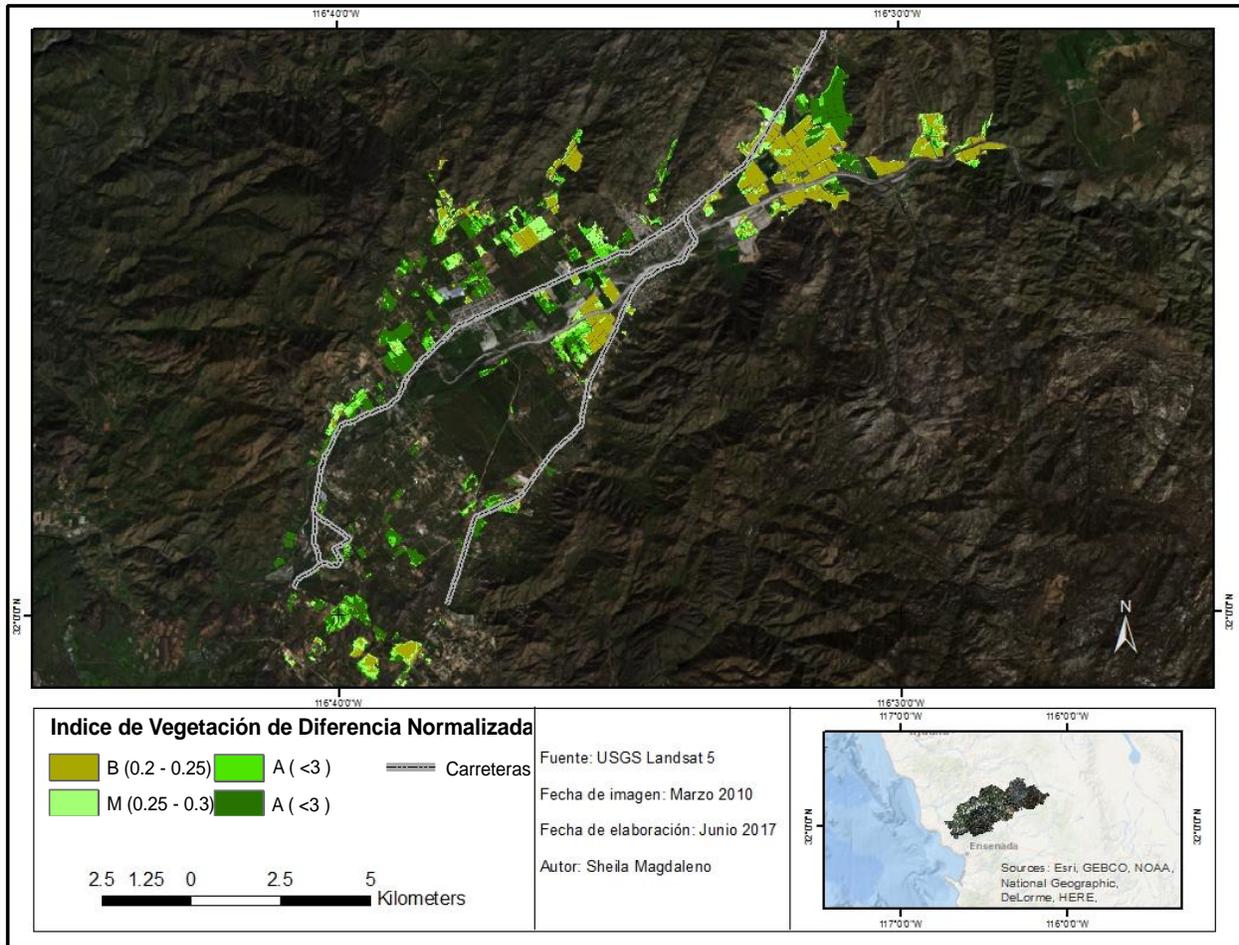
*En este caso se graficó el SPI de cada 12 meses.

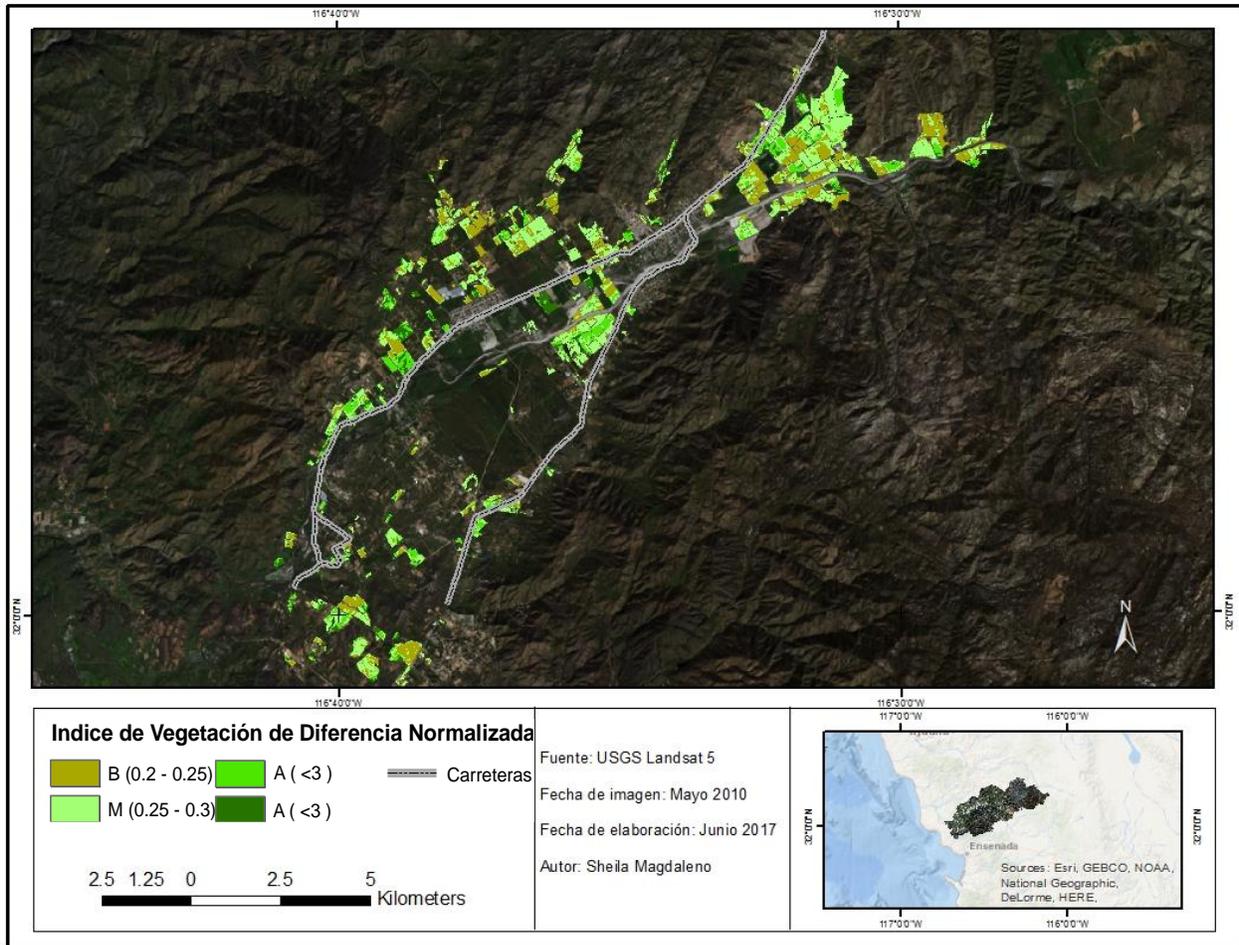
Anexo 4. Mapas de NDVI del cultivo de Vid en el VG, correspondiente al año 2010.

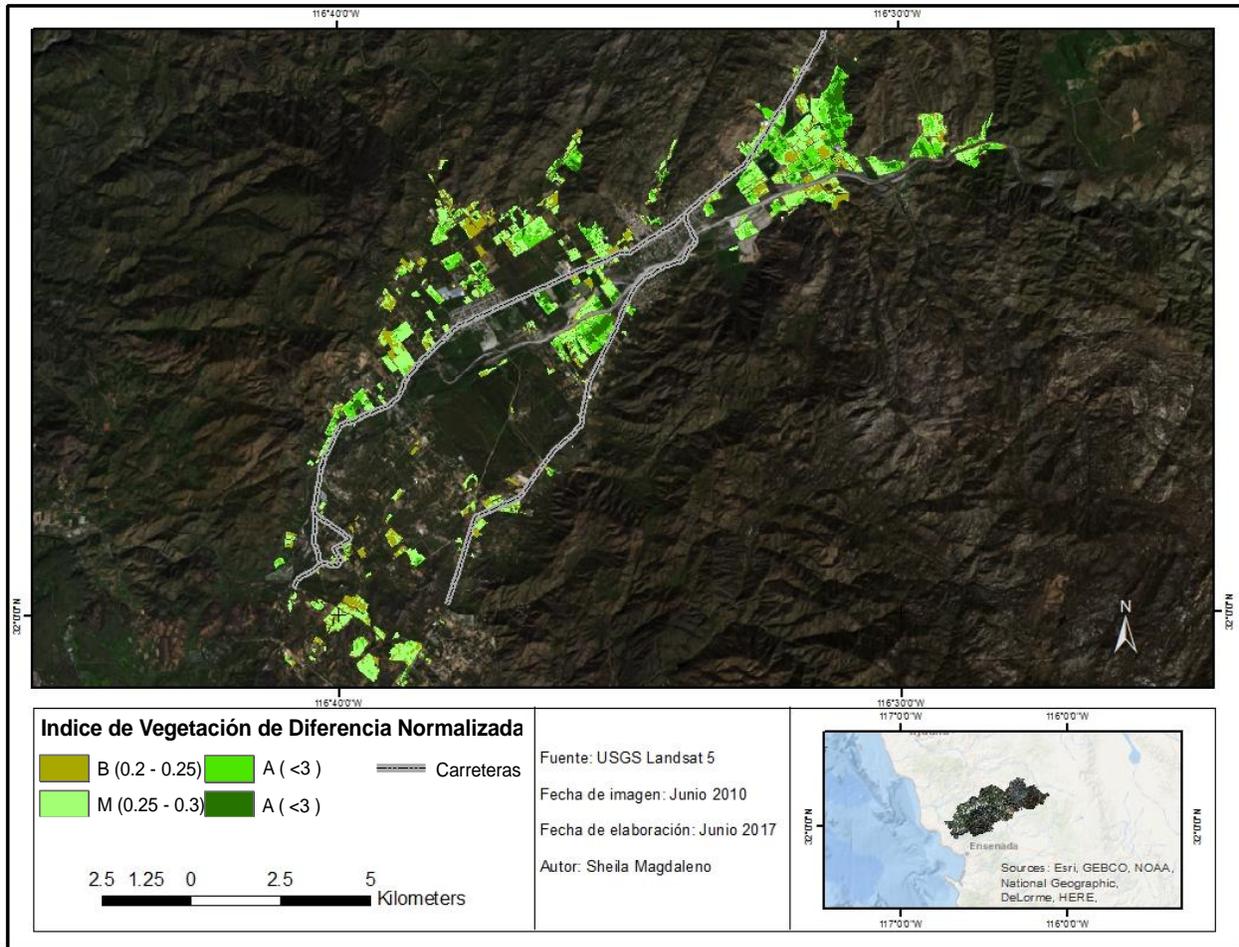
Fuente: Elaboración propia

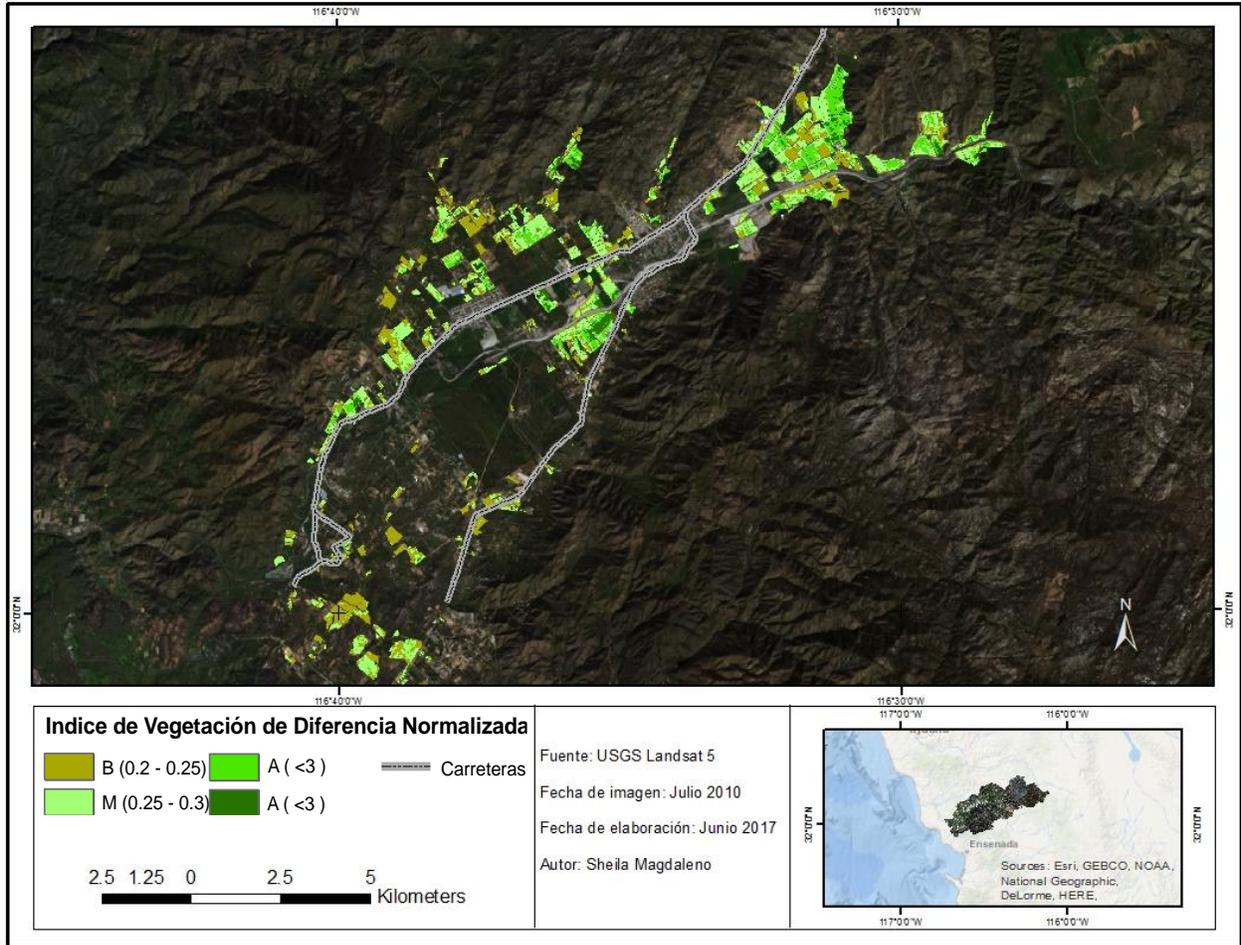


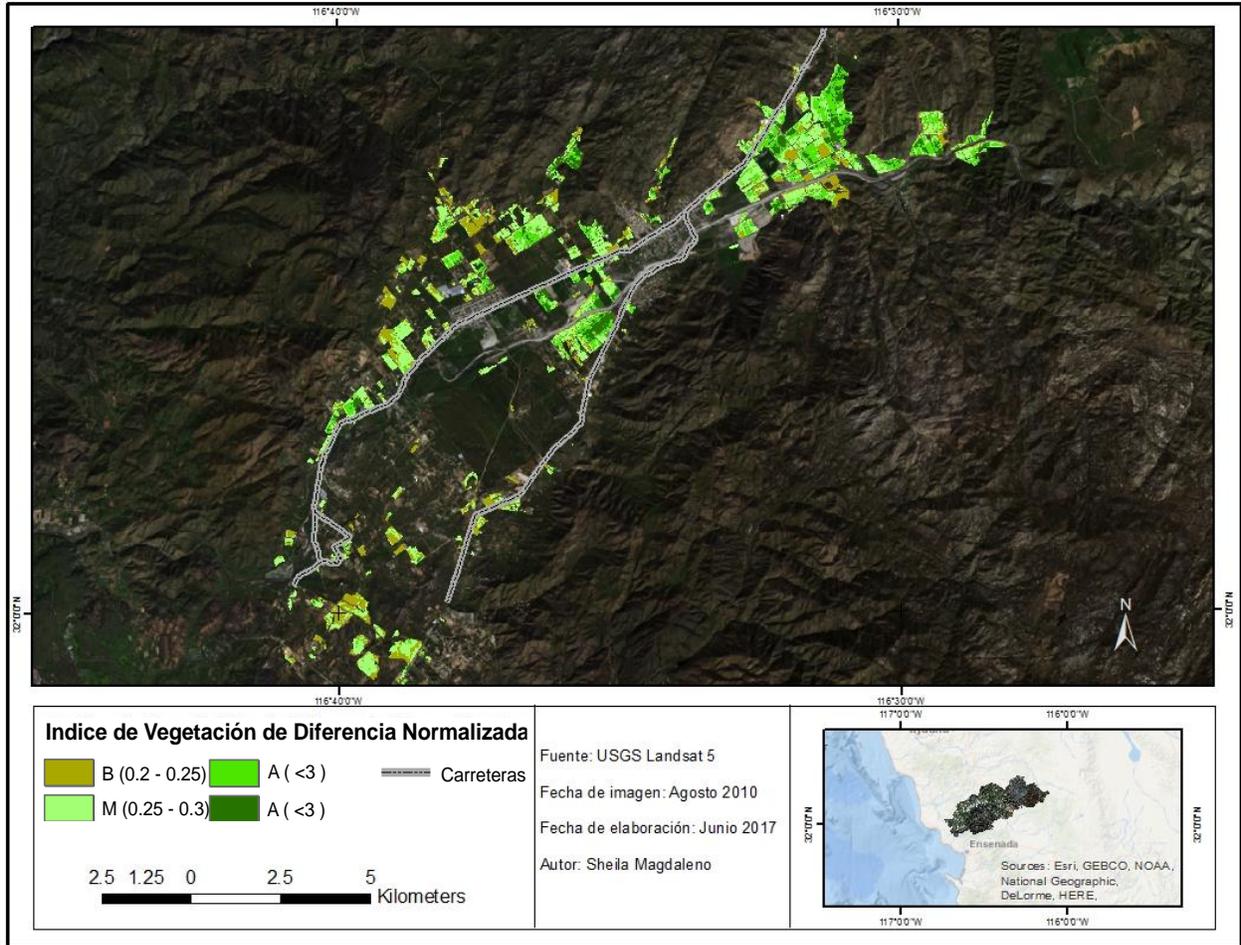


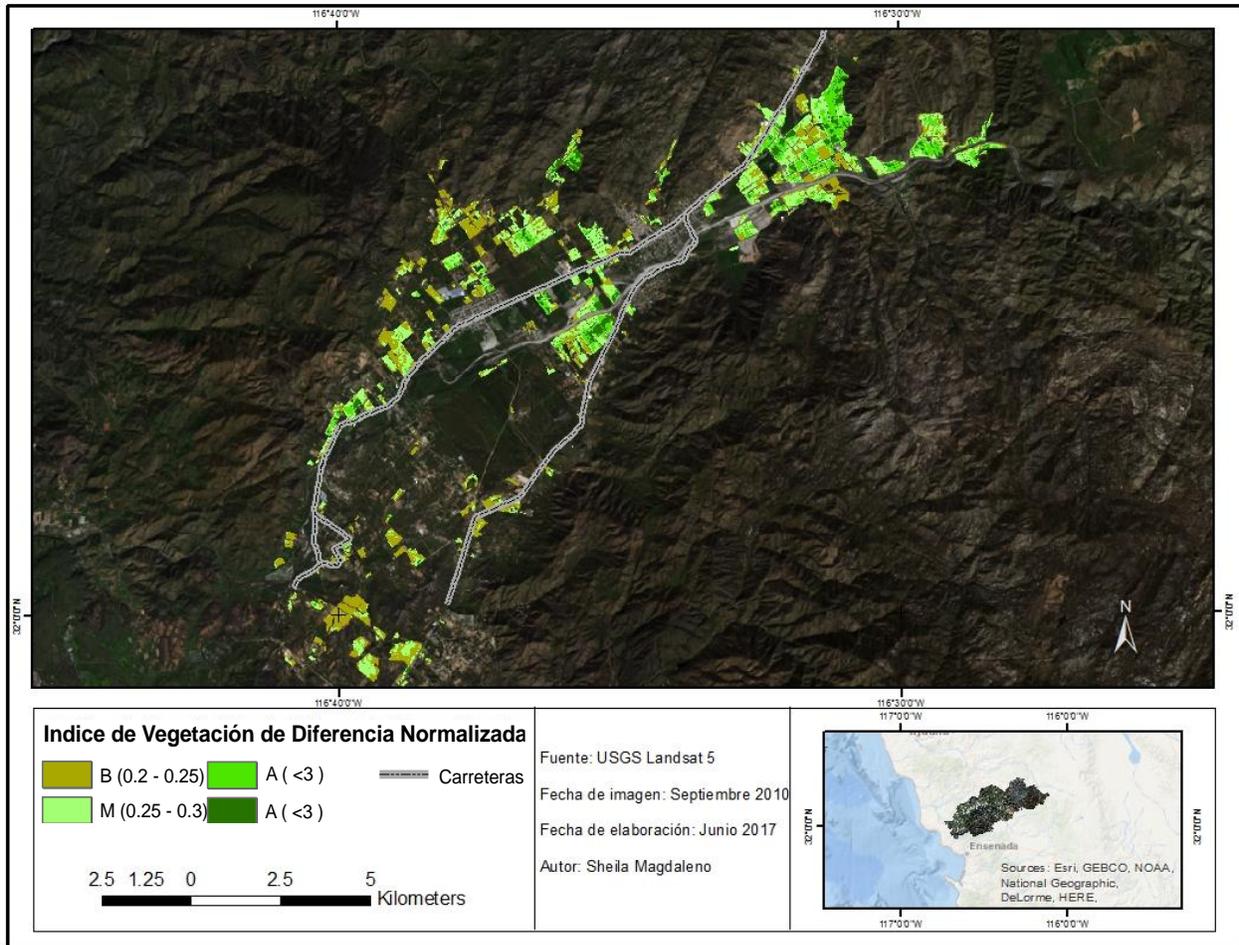


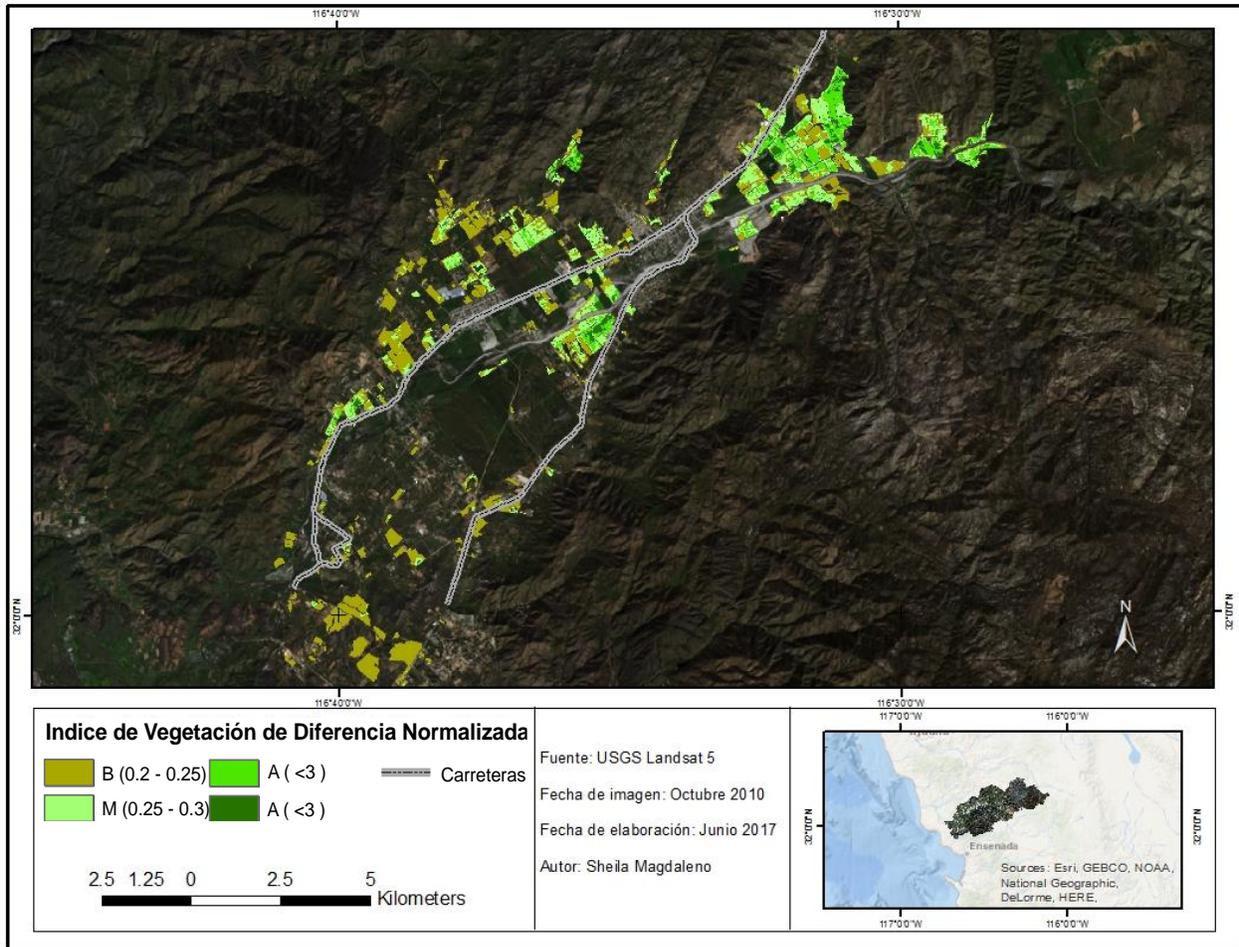


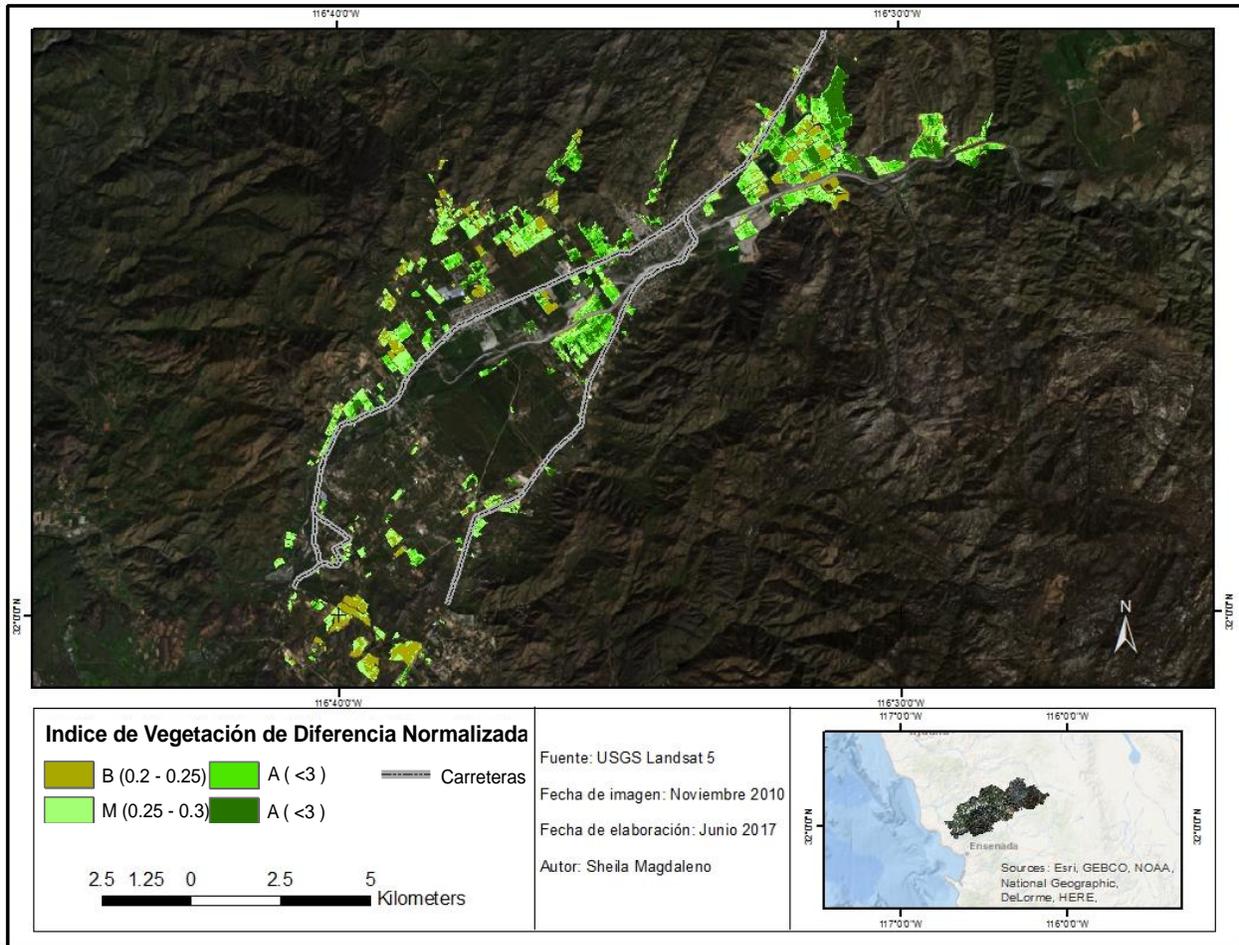


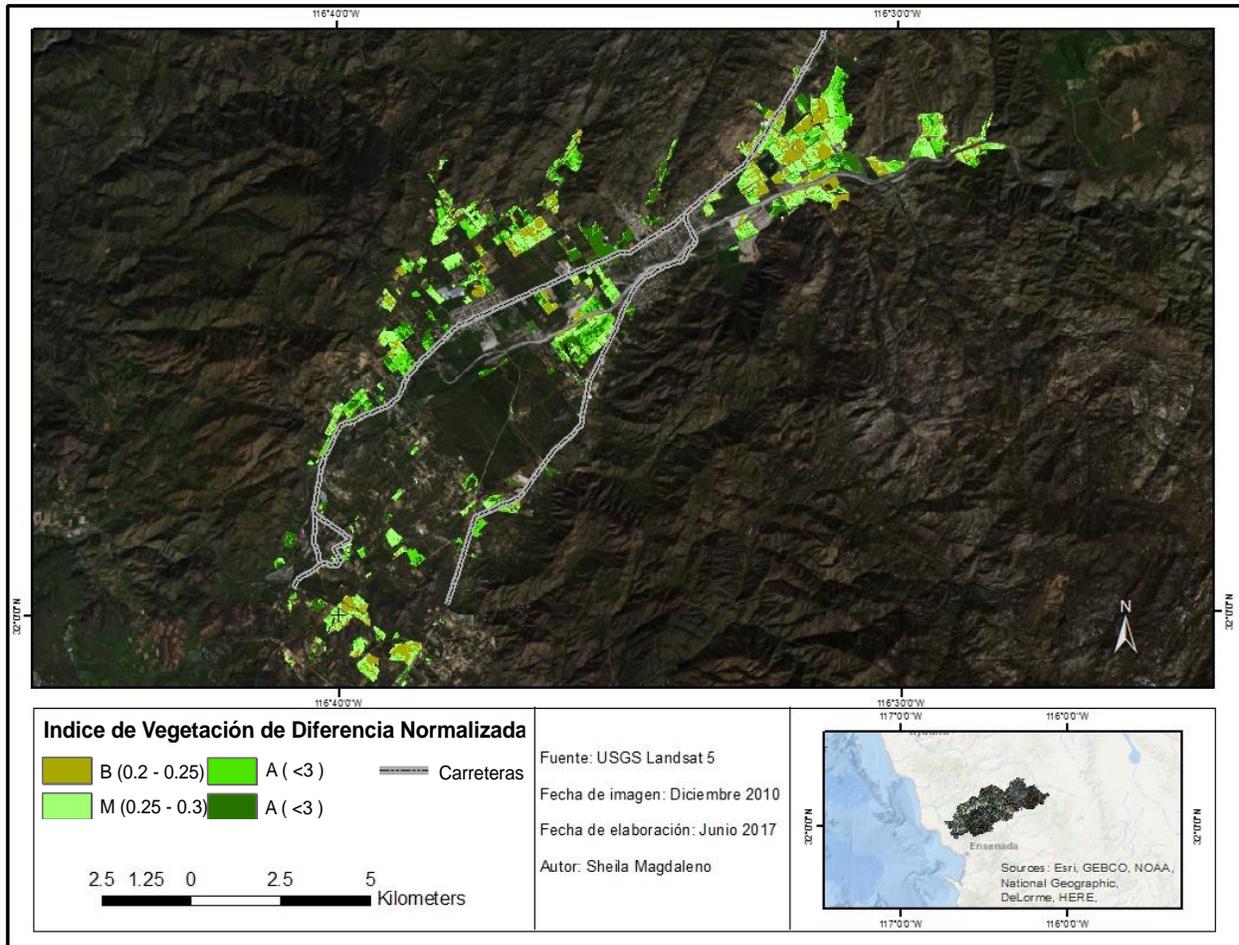




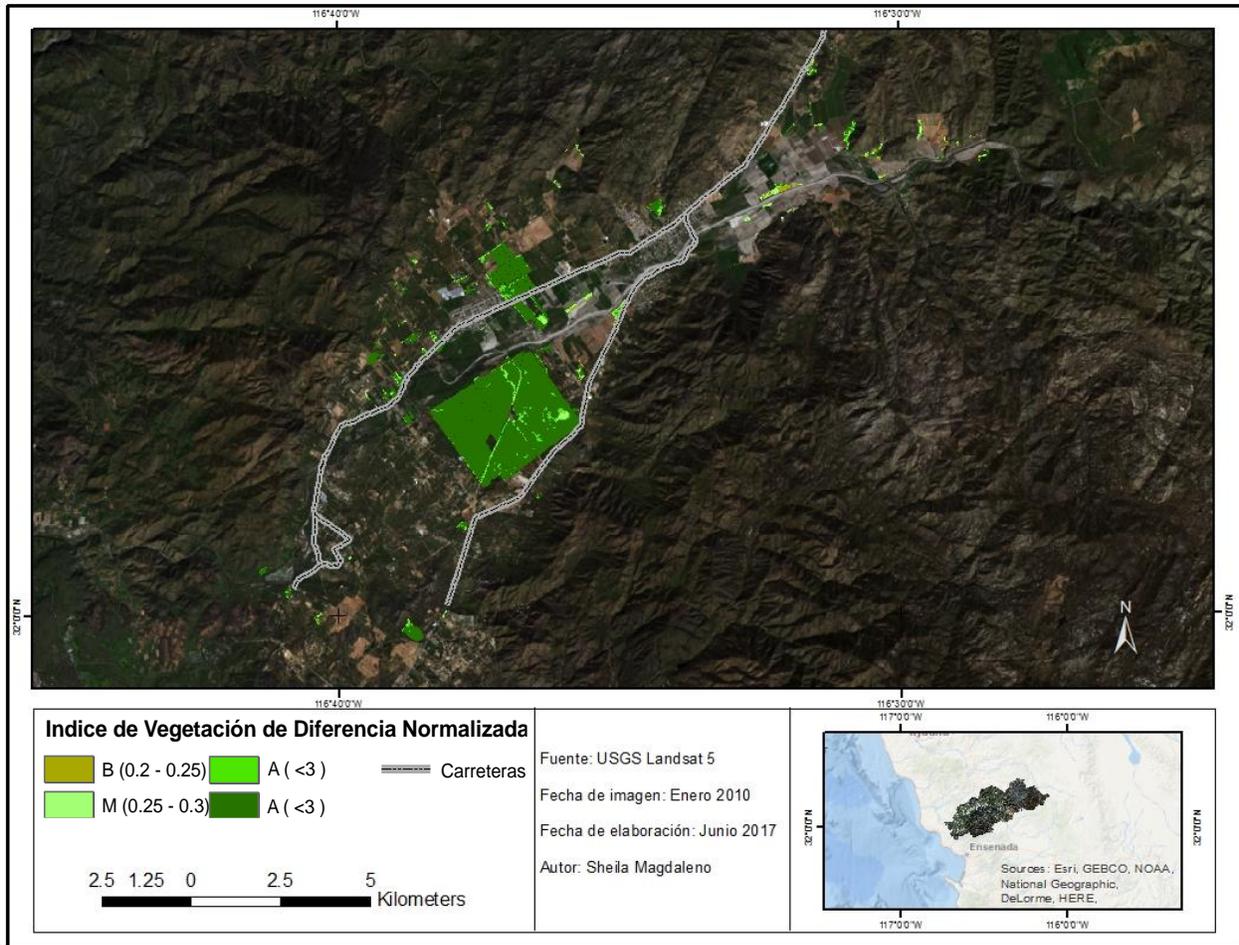


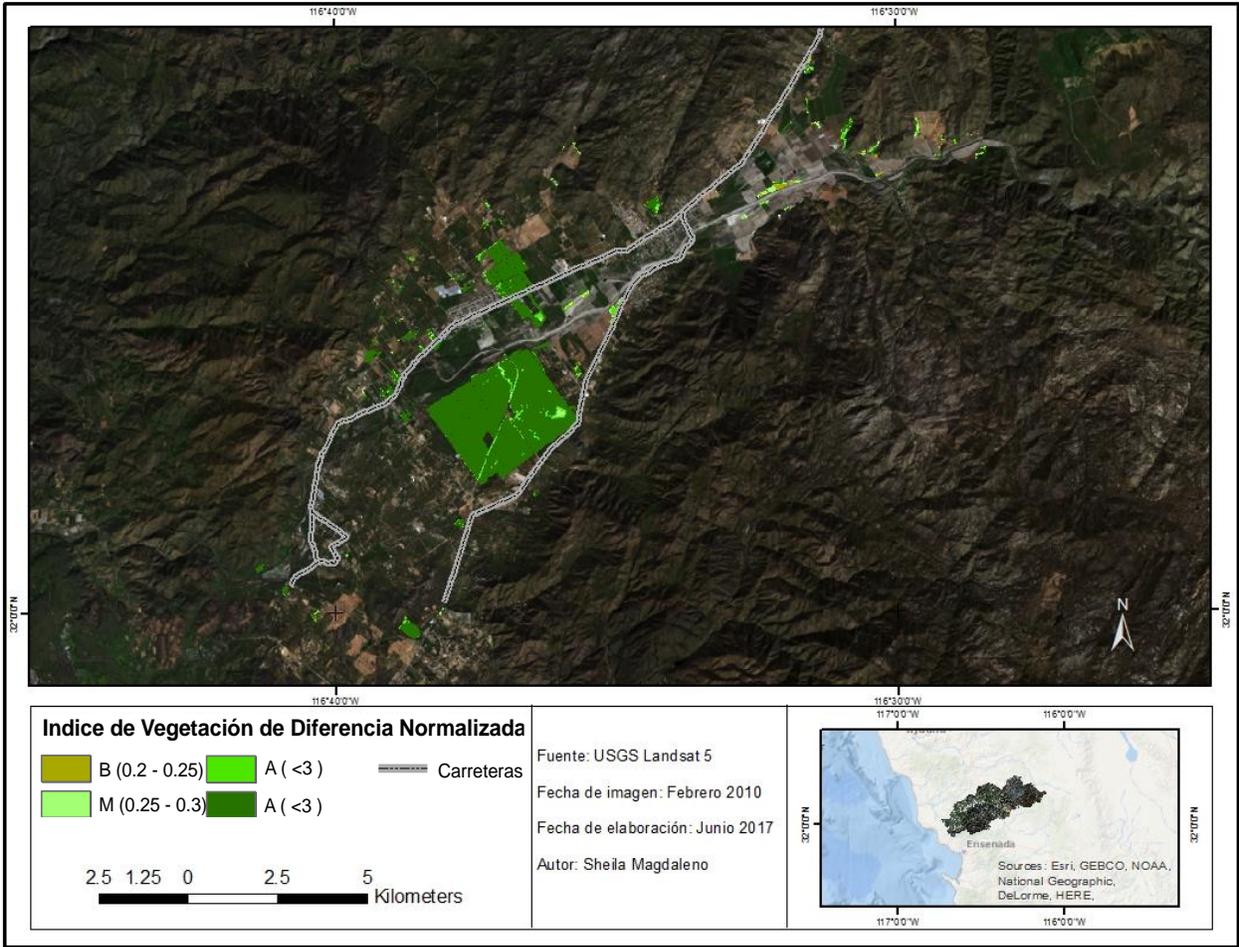


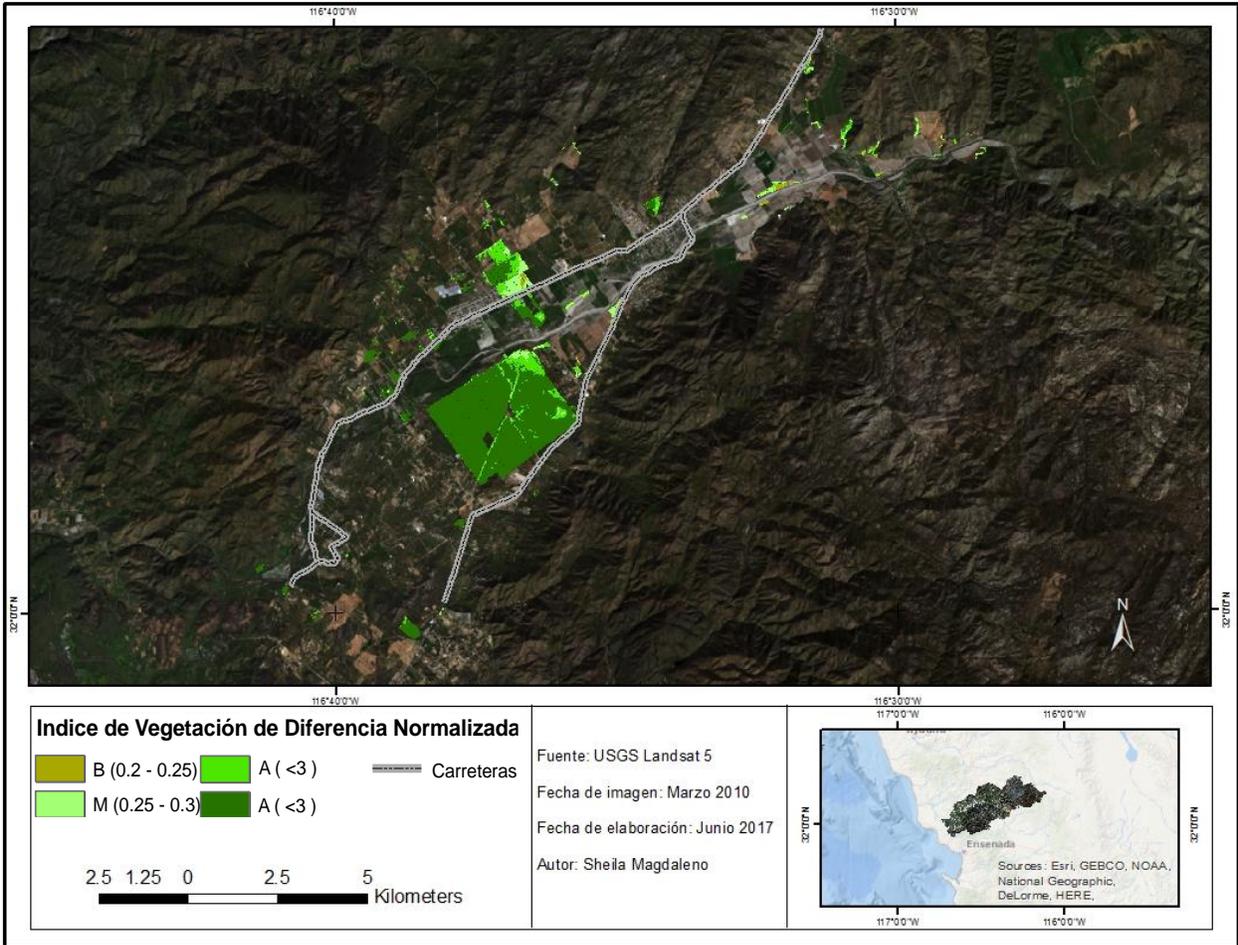


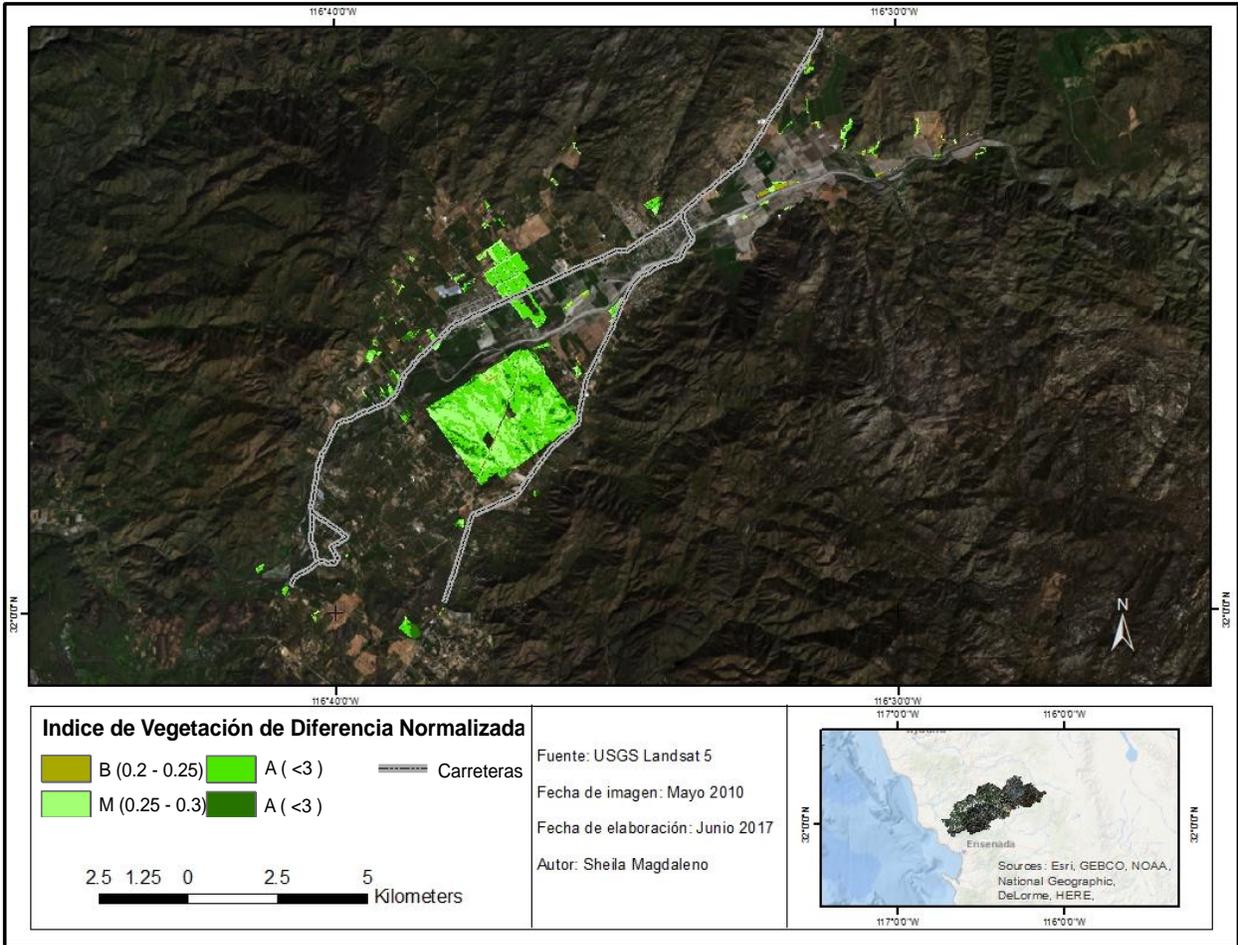


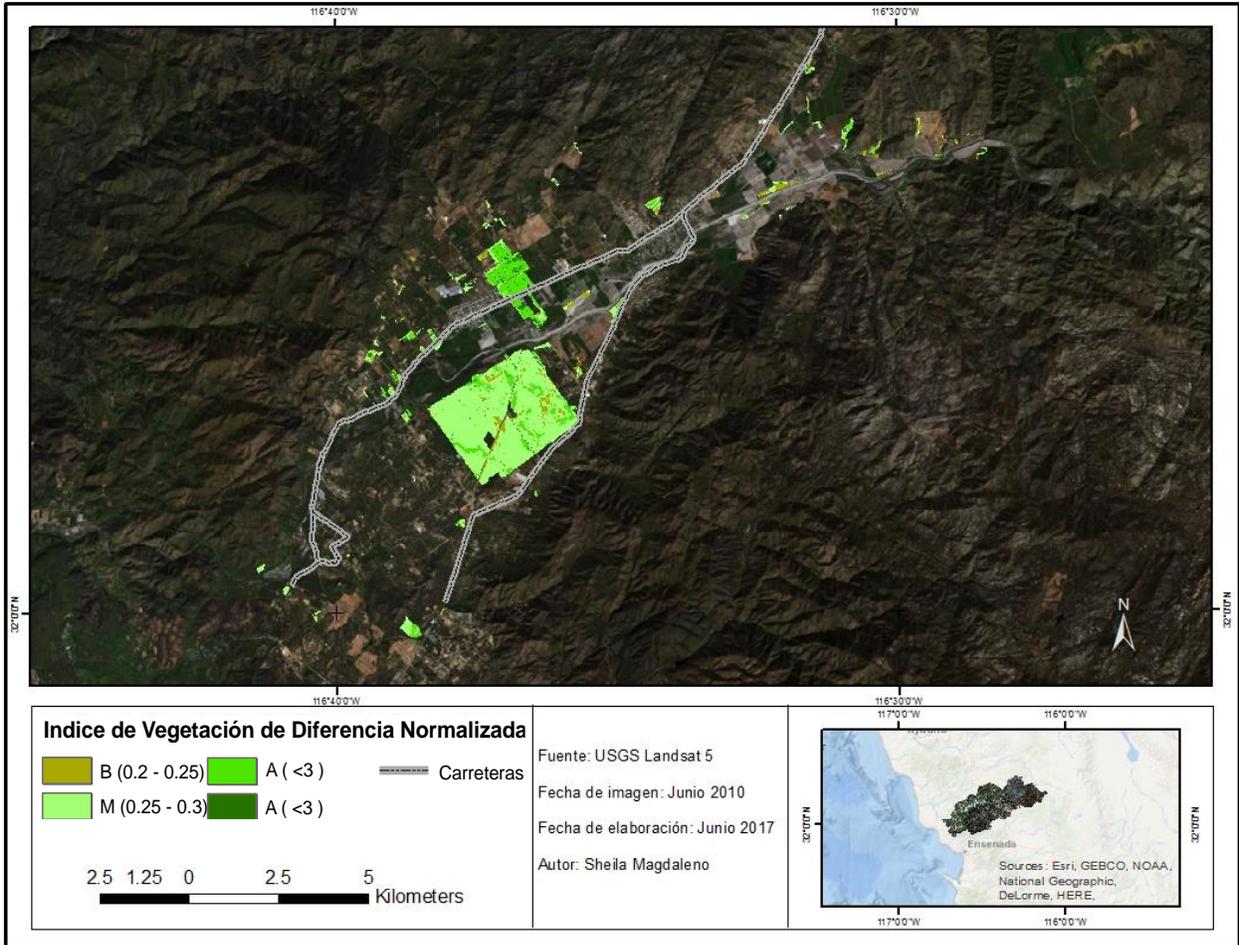
Anexo 5. Mapas de NDVI del cultivo de Olivo en el VG, correspondiente al año 2010.
 Fuente: Elaboración propia

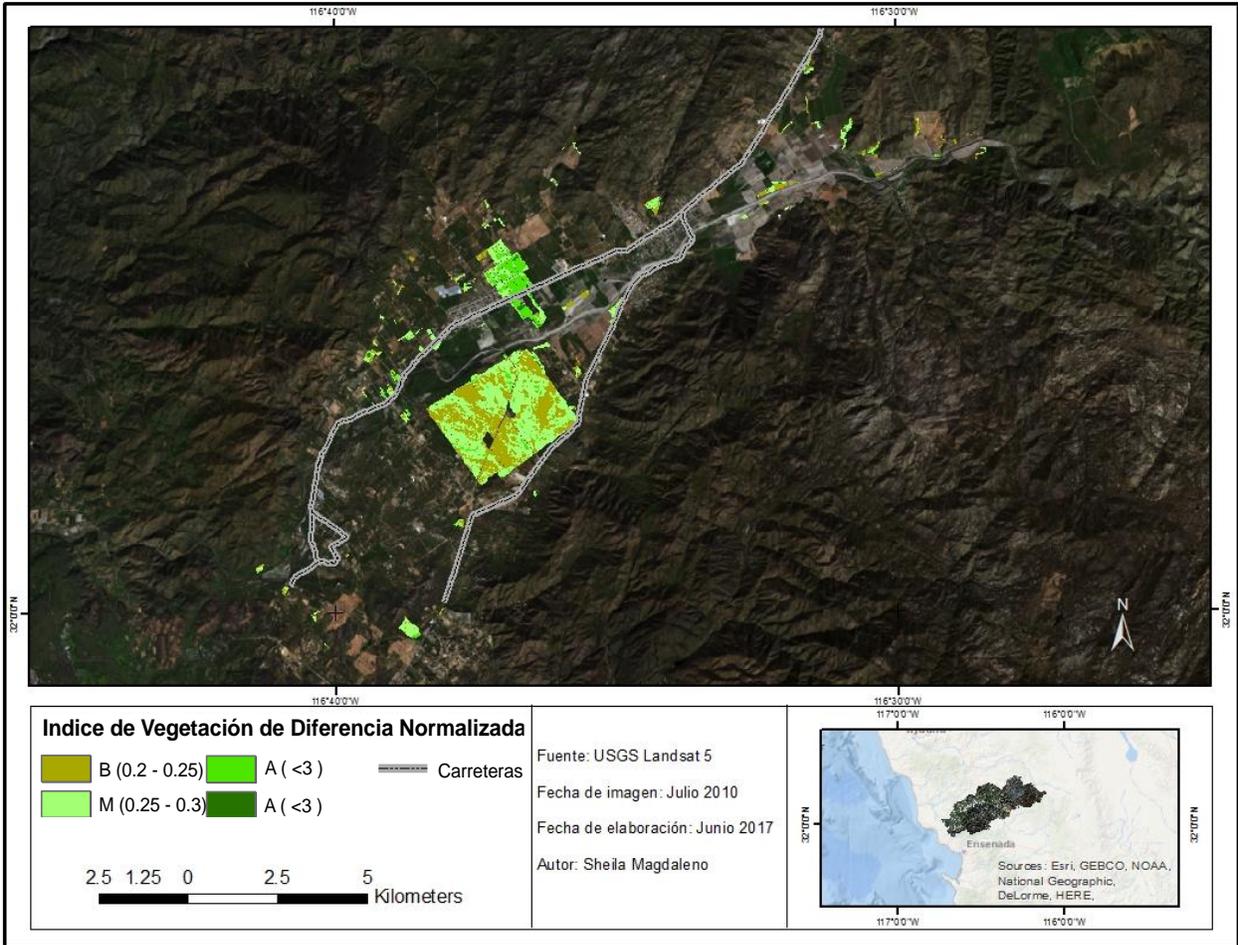


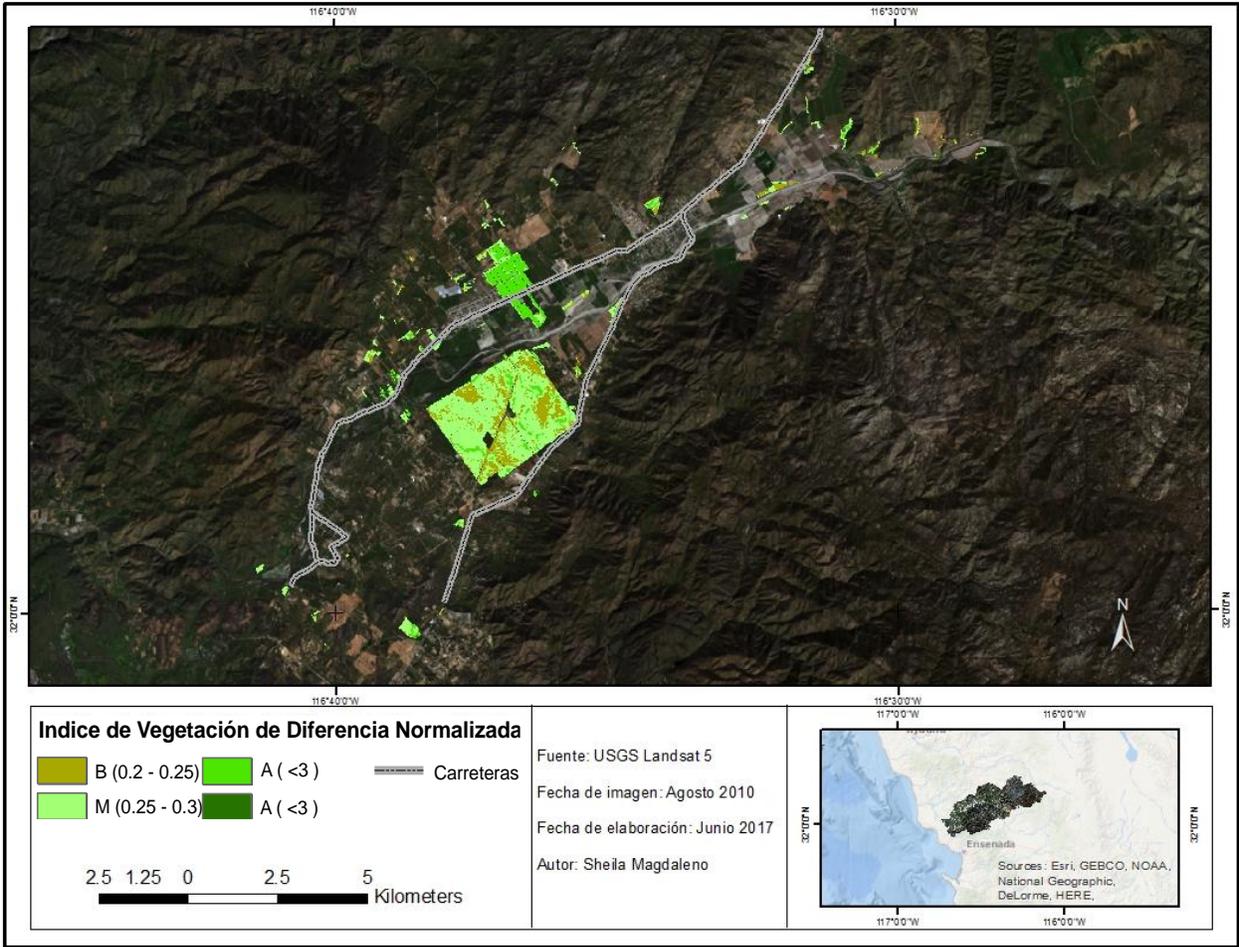


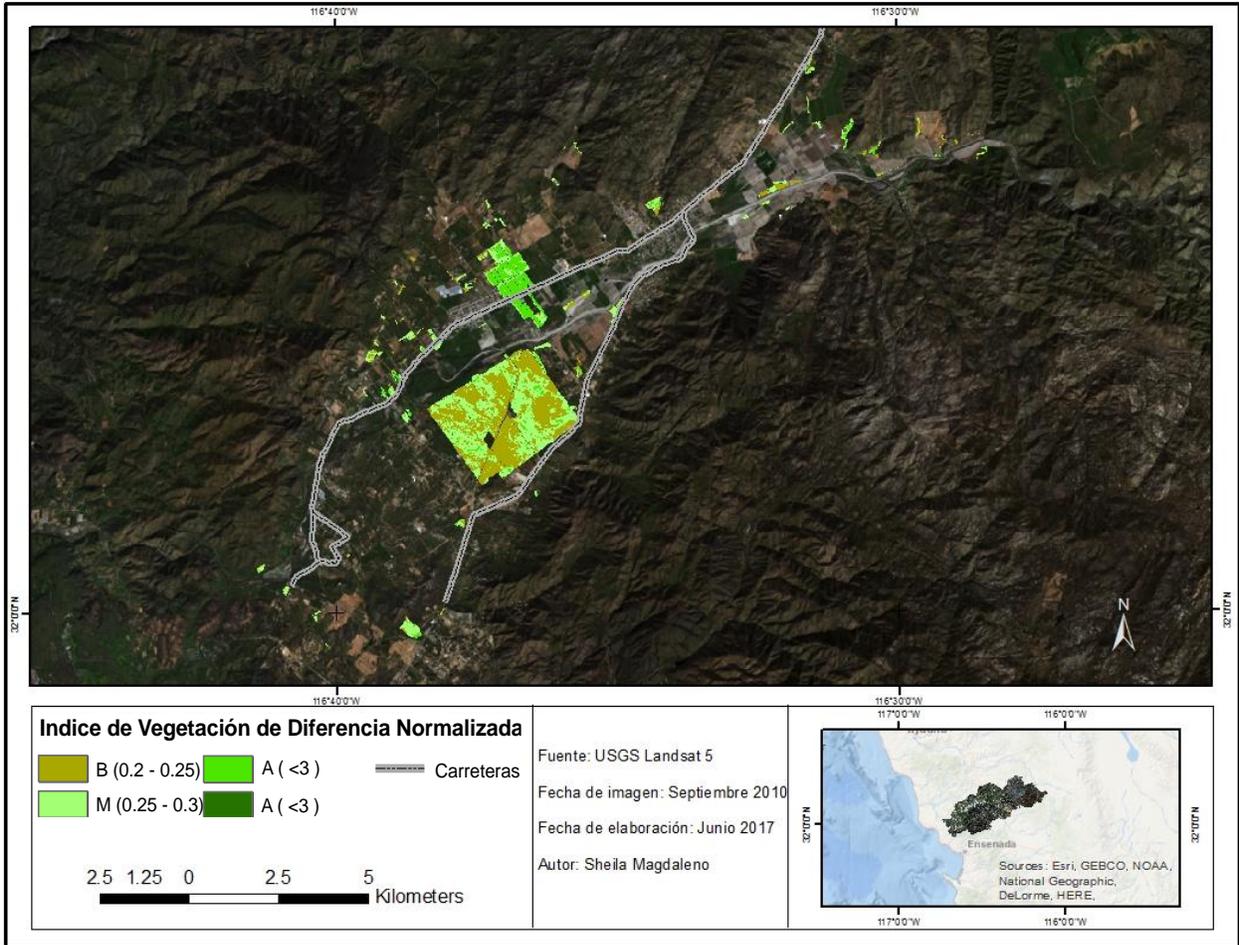


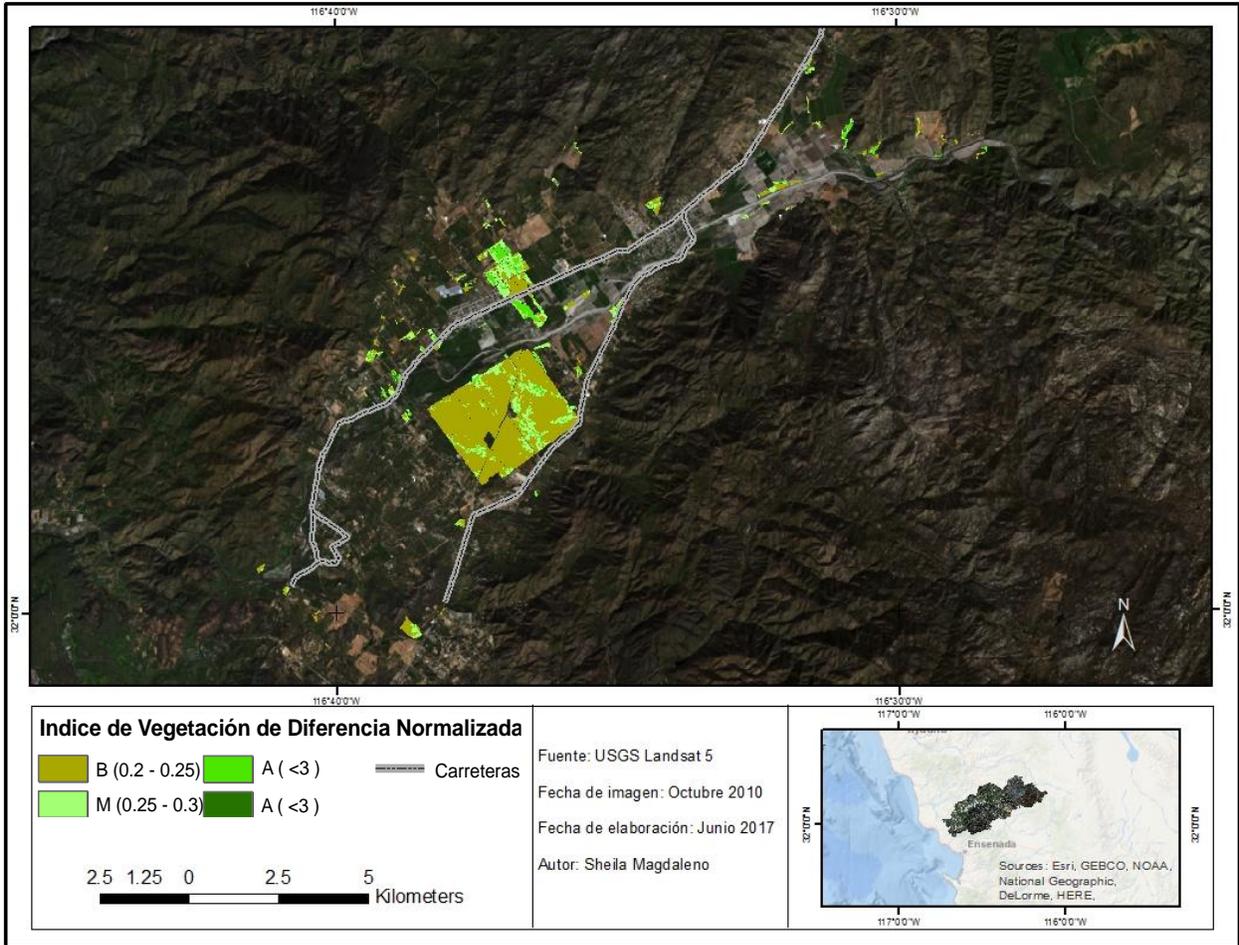


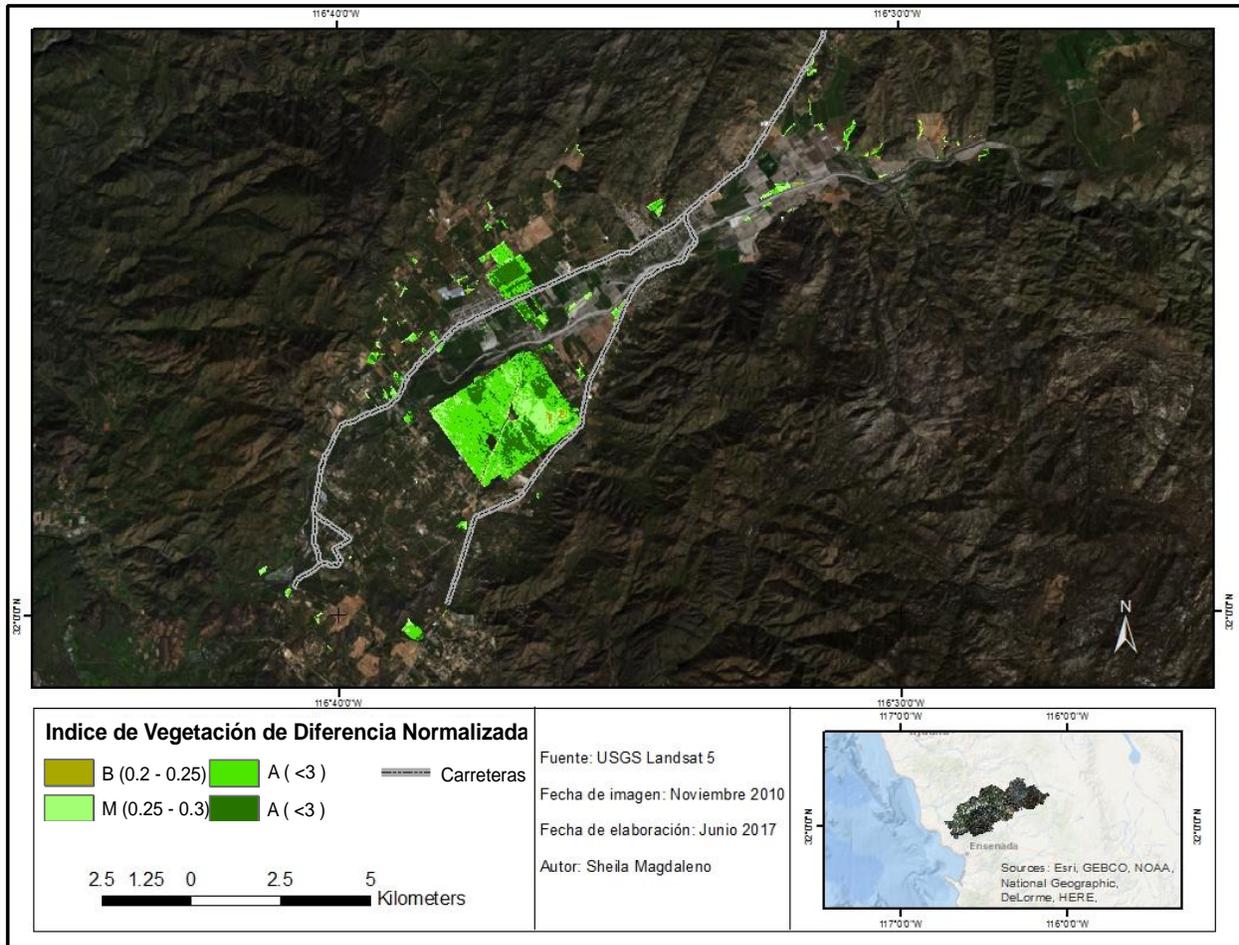


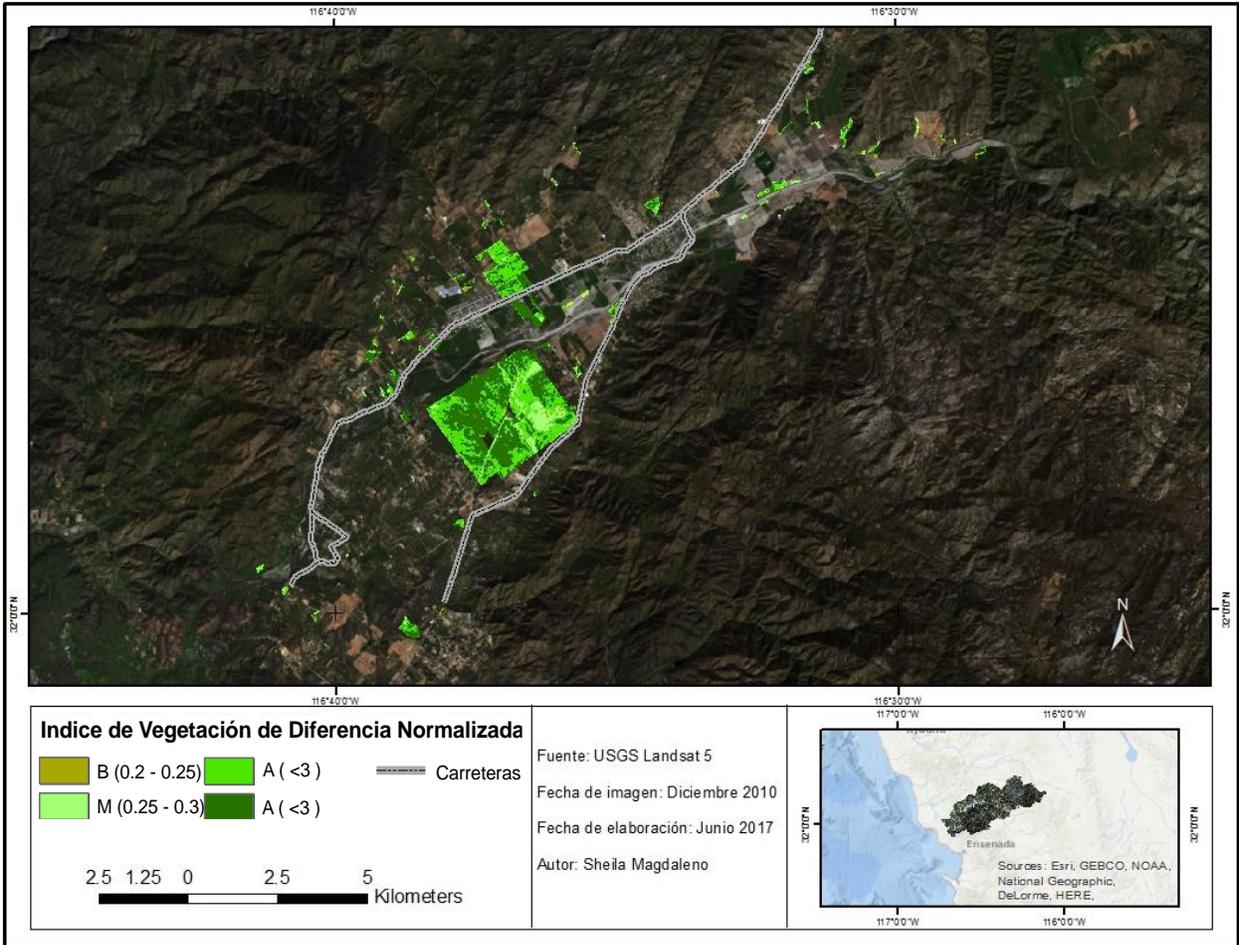




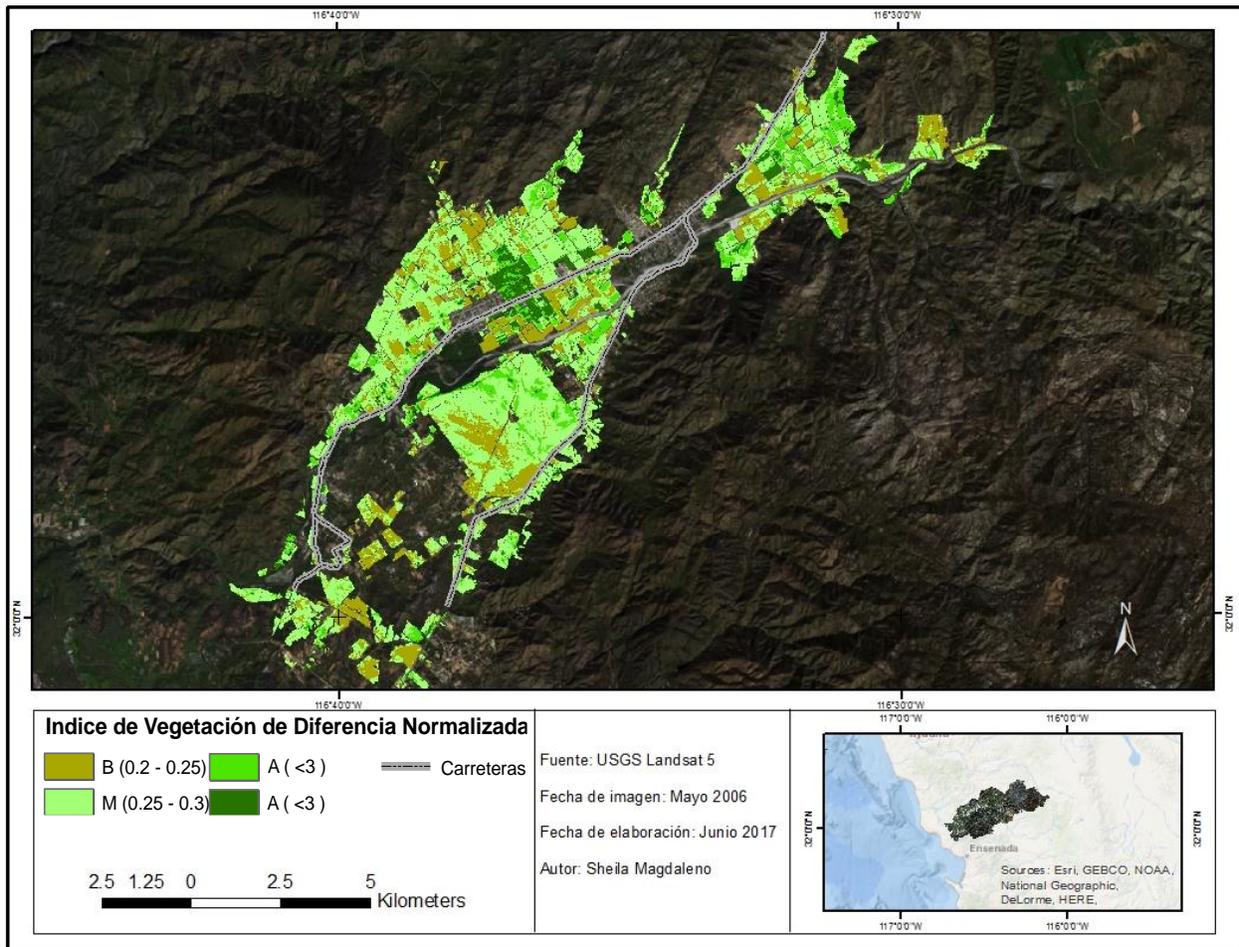


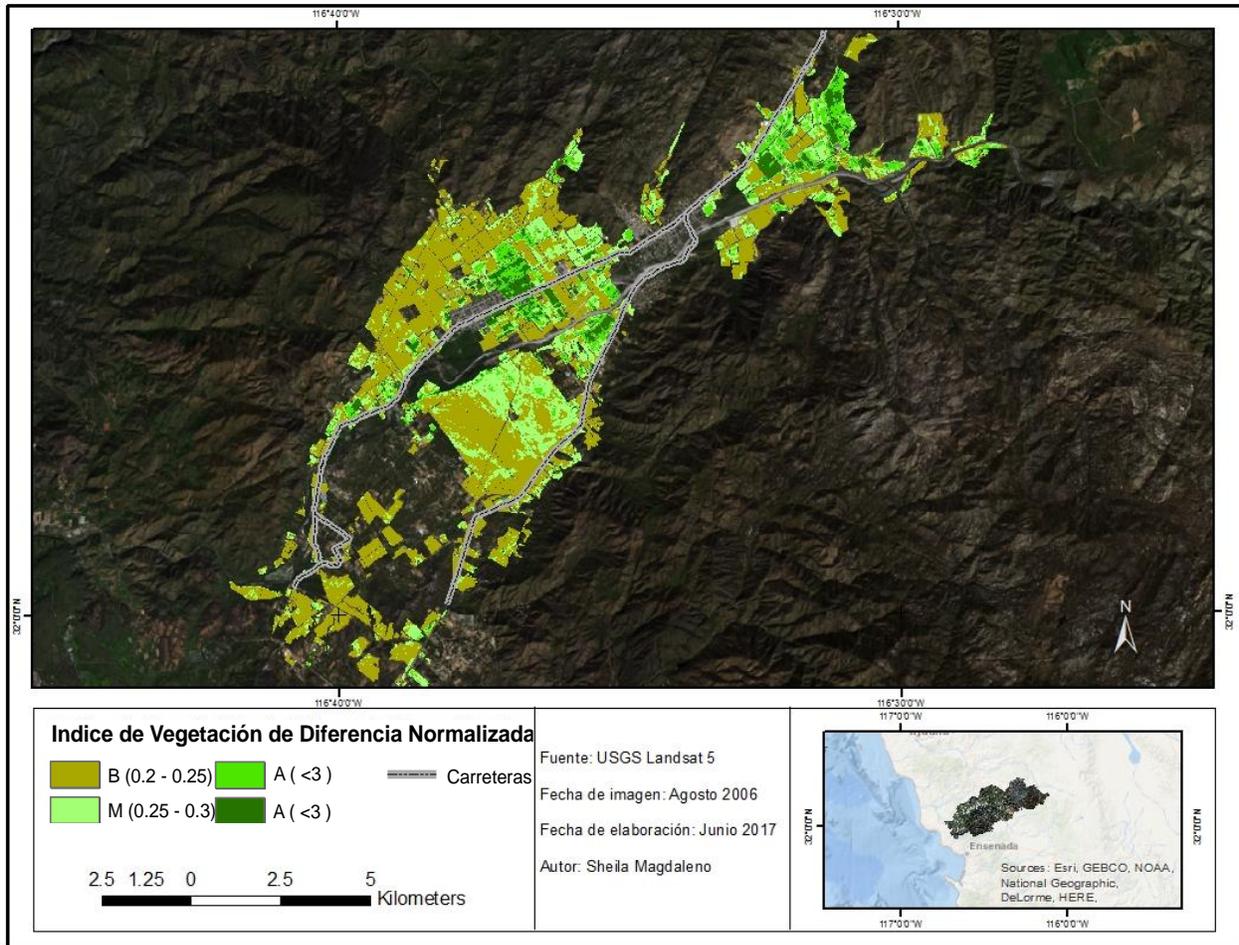


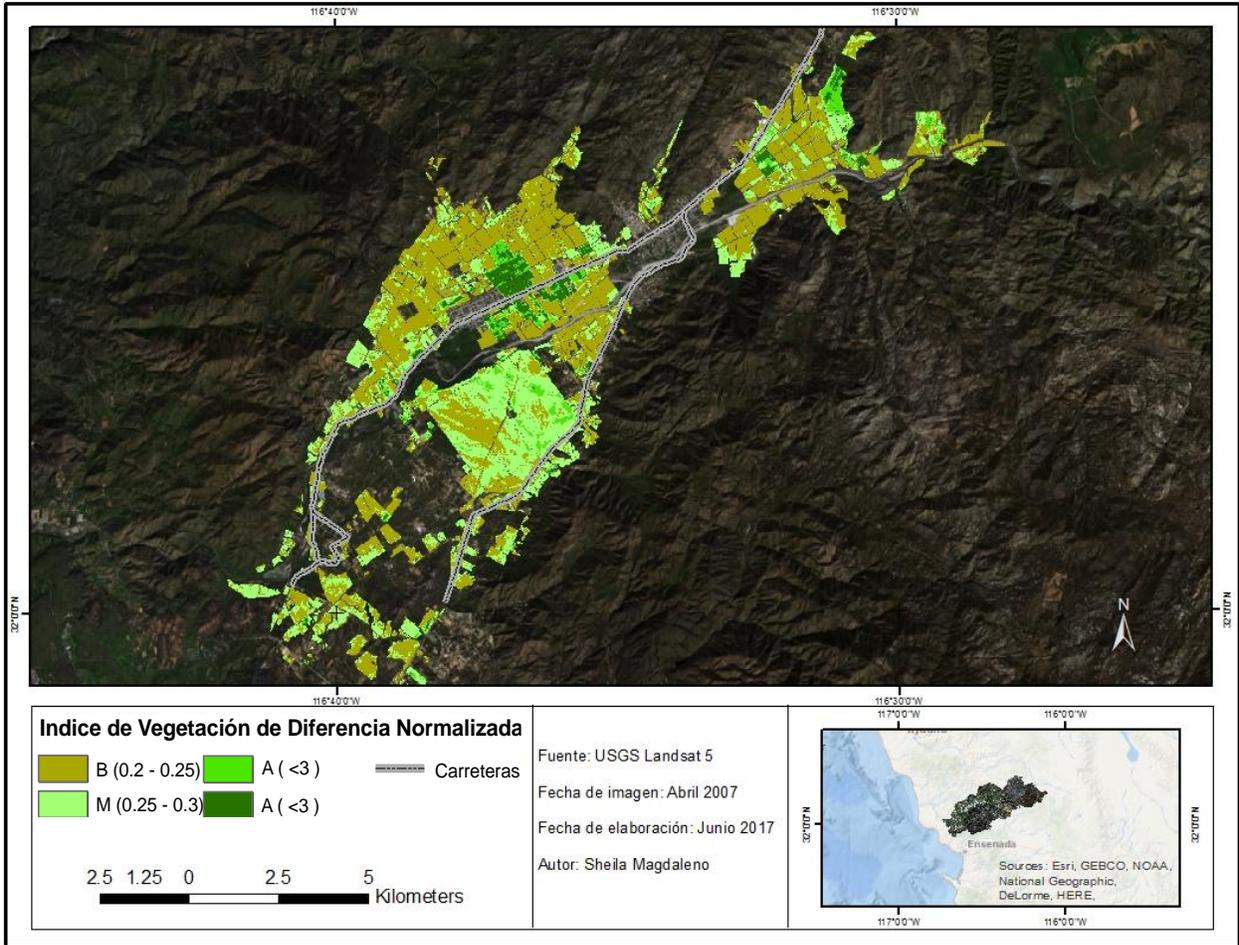


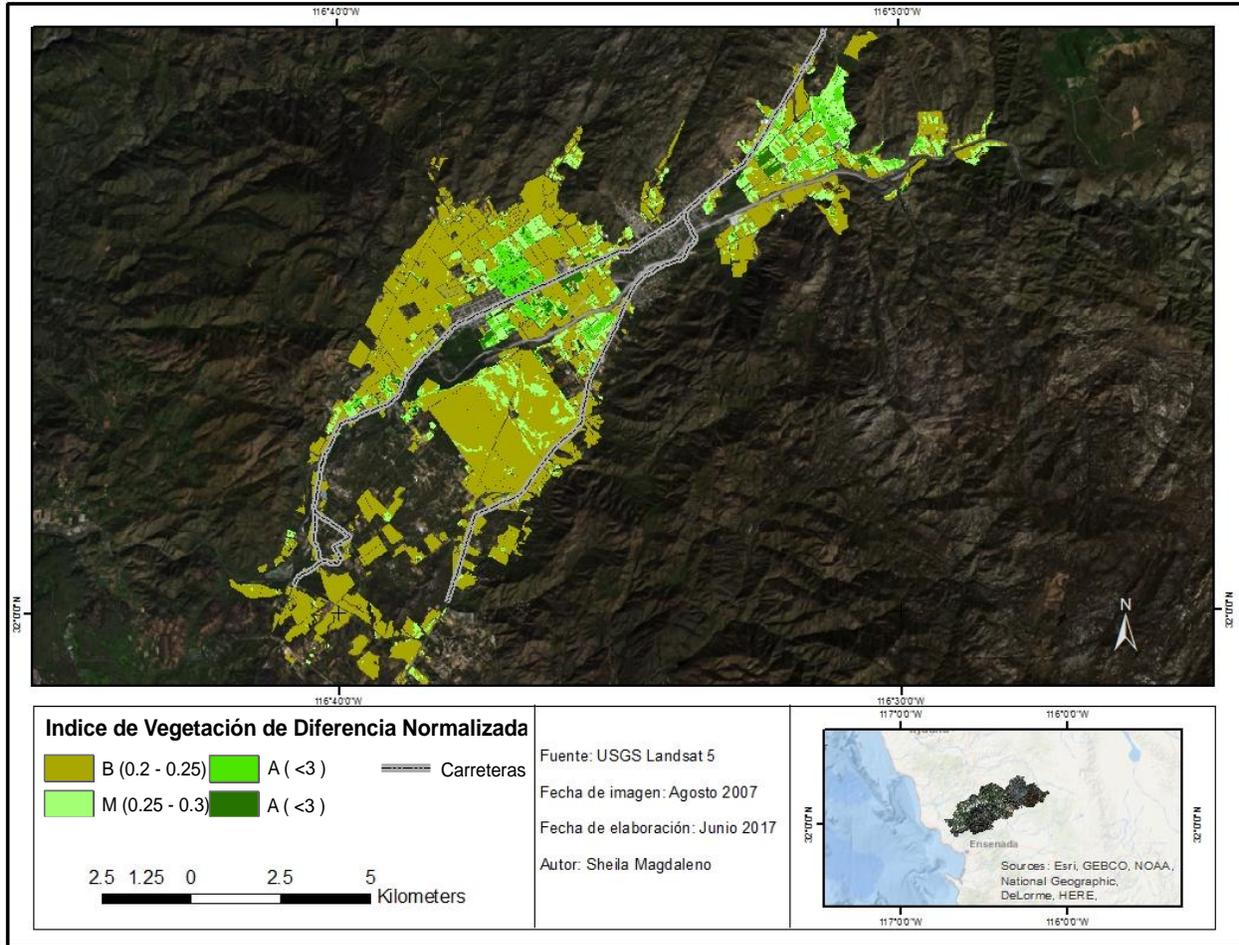


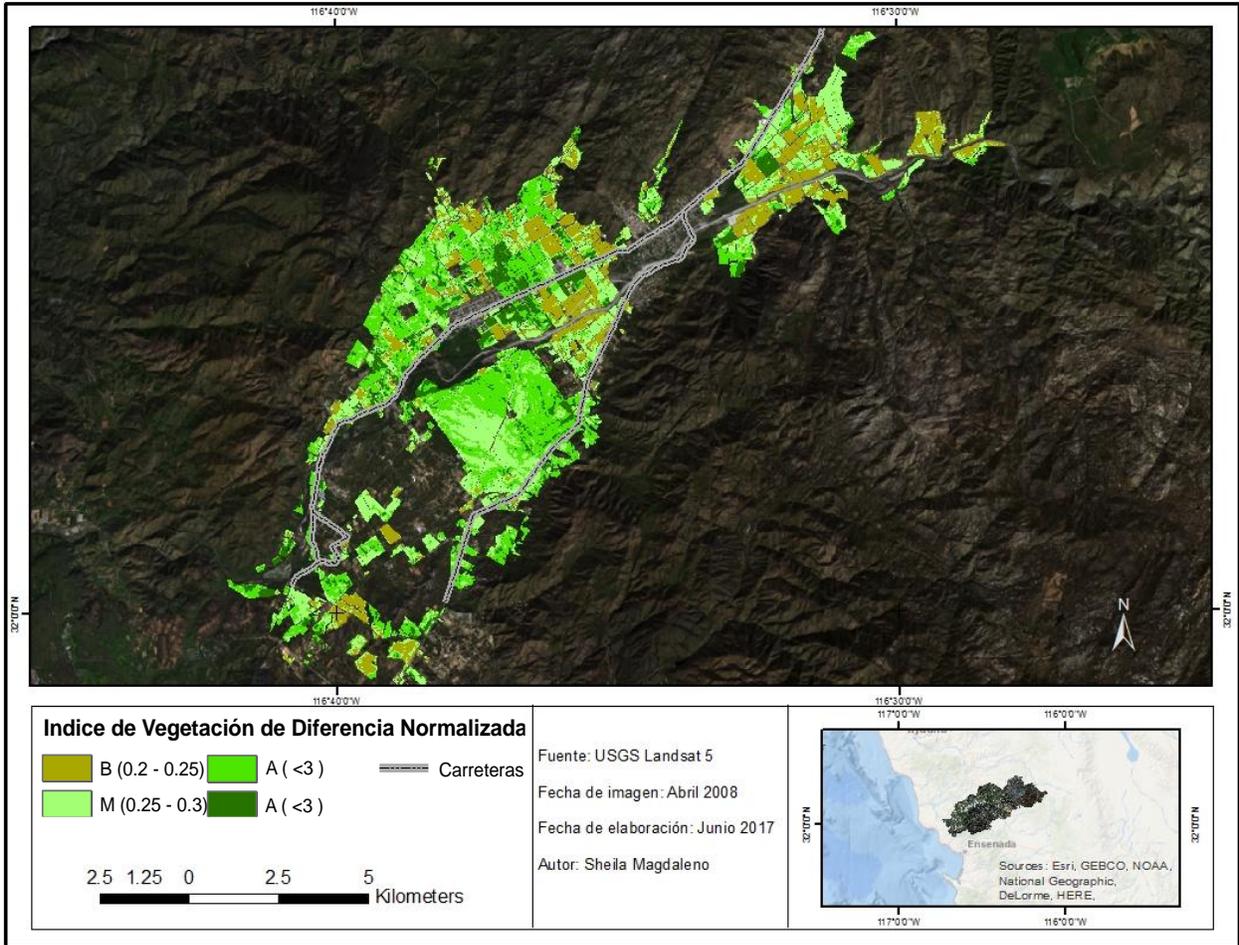
Anexo 6. NDVI correspondiente a el uso de suelo agrícola de VG durante primavera y verano de la última década.
 Fuente: Elaboración propia.

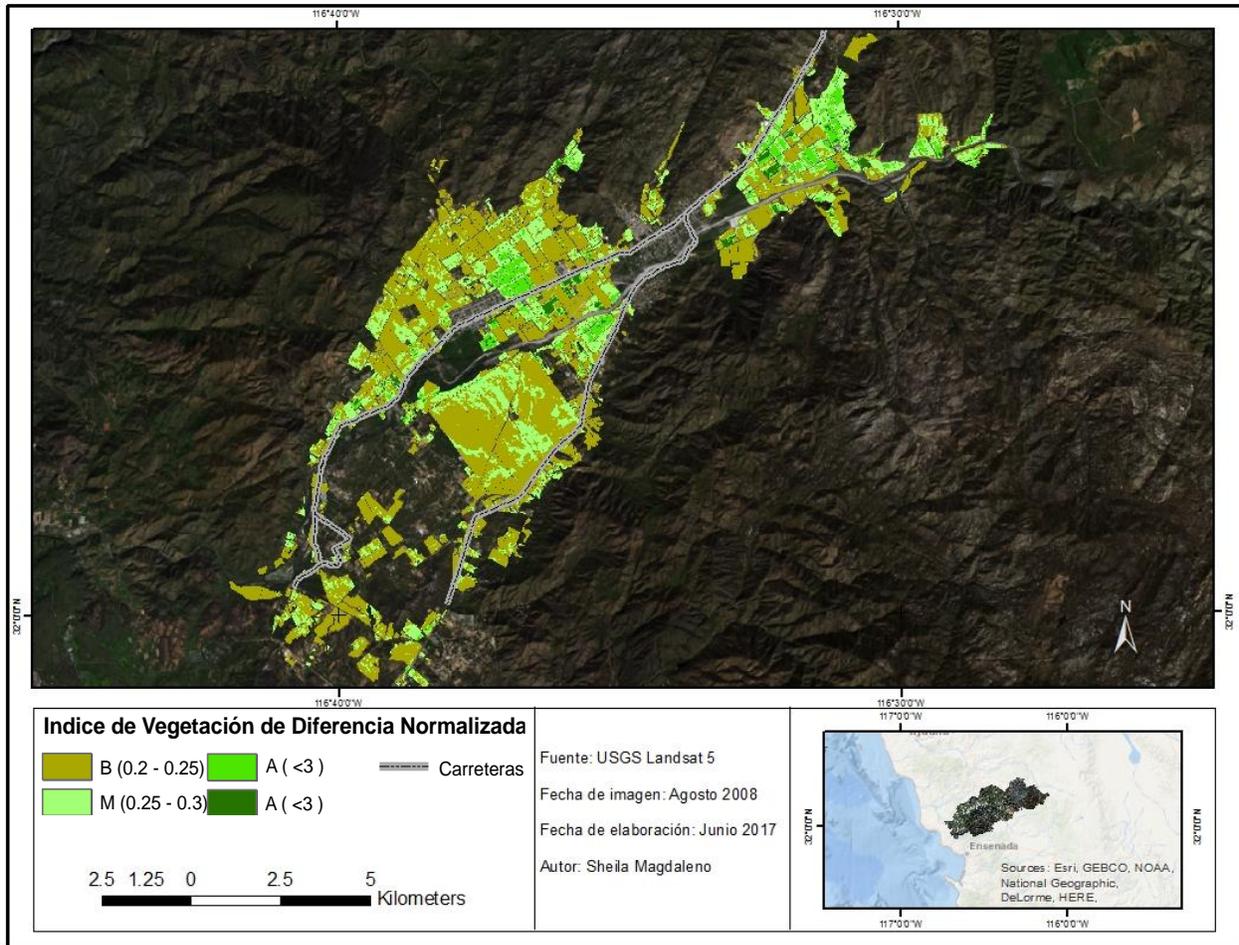


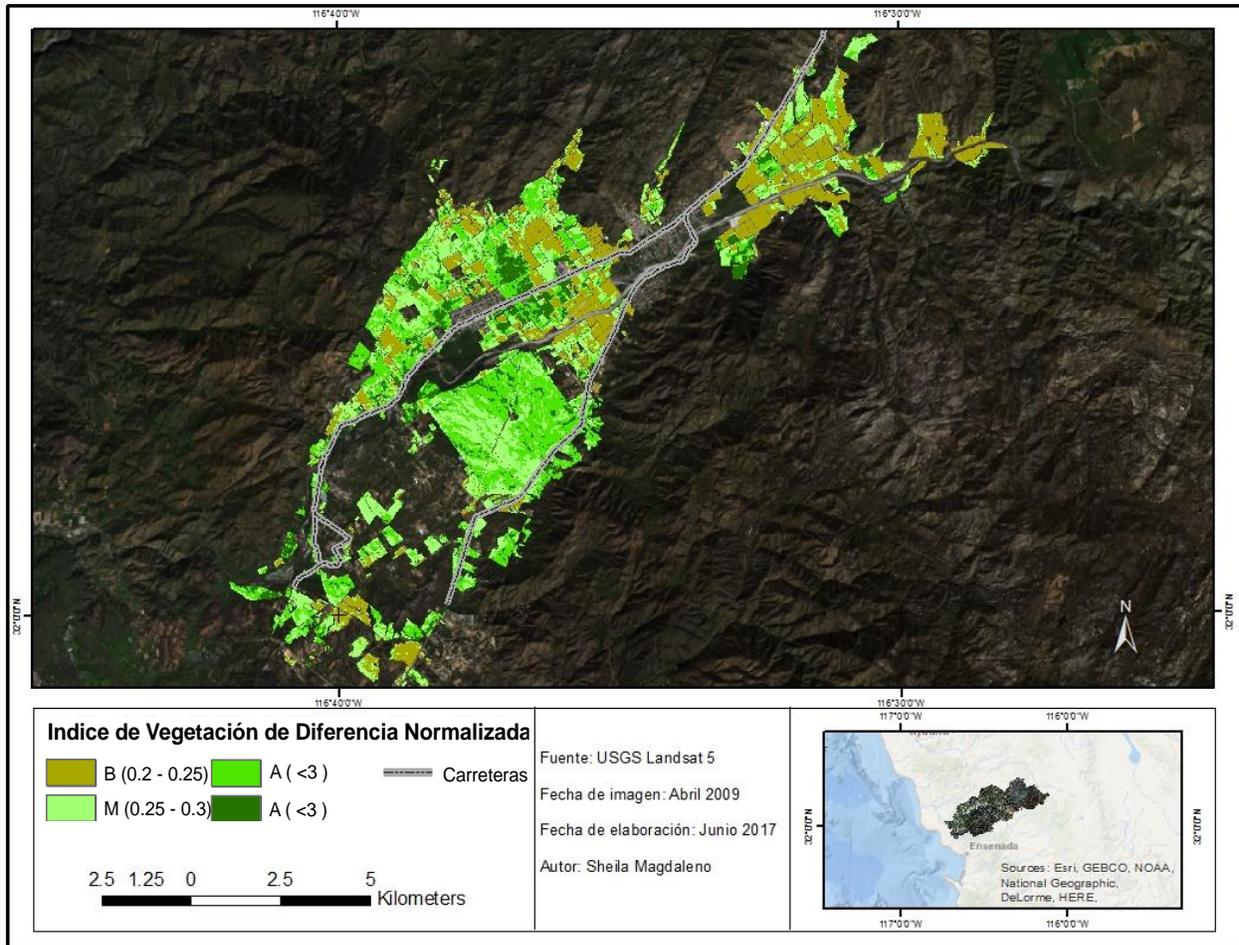


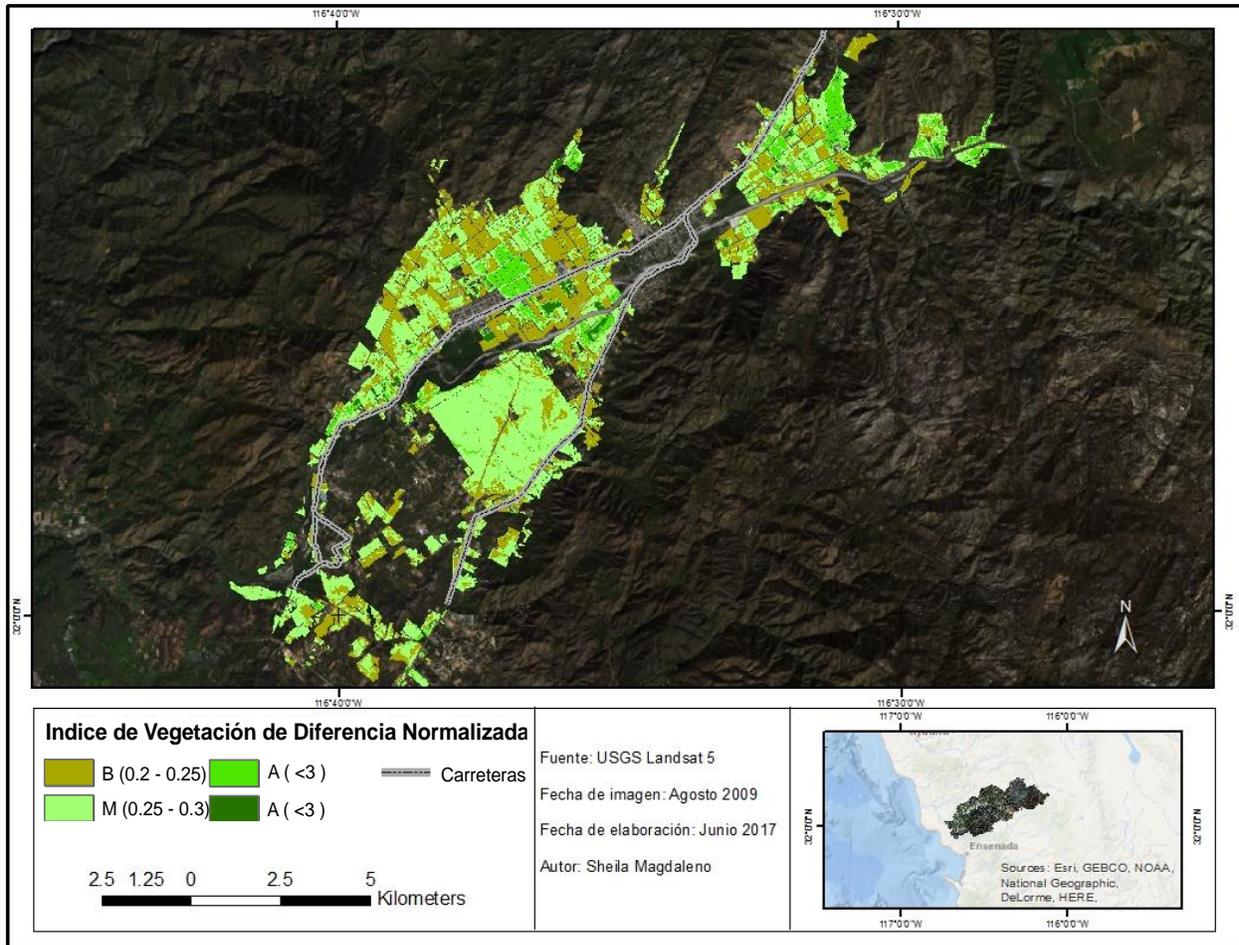


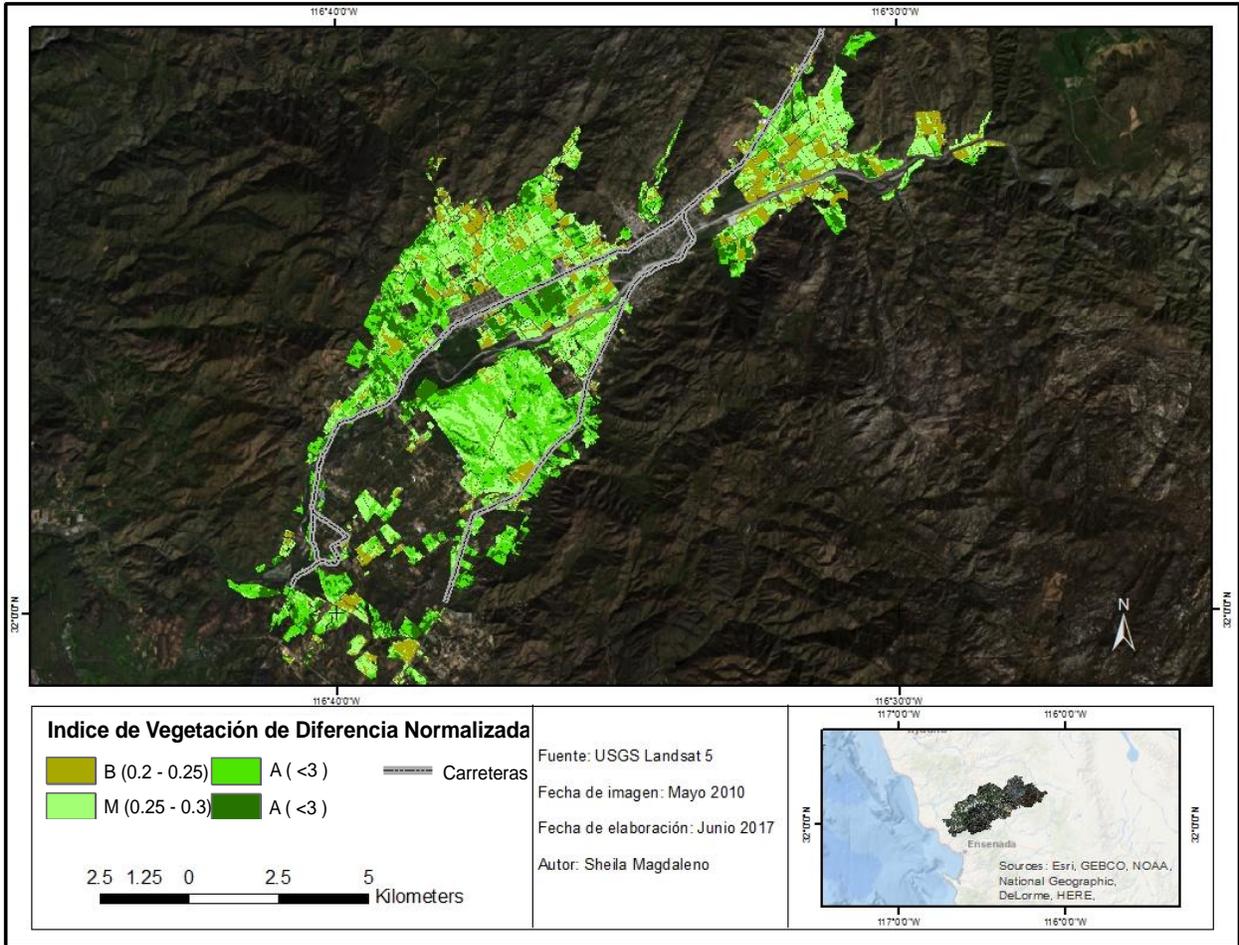


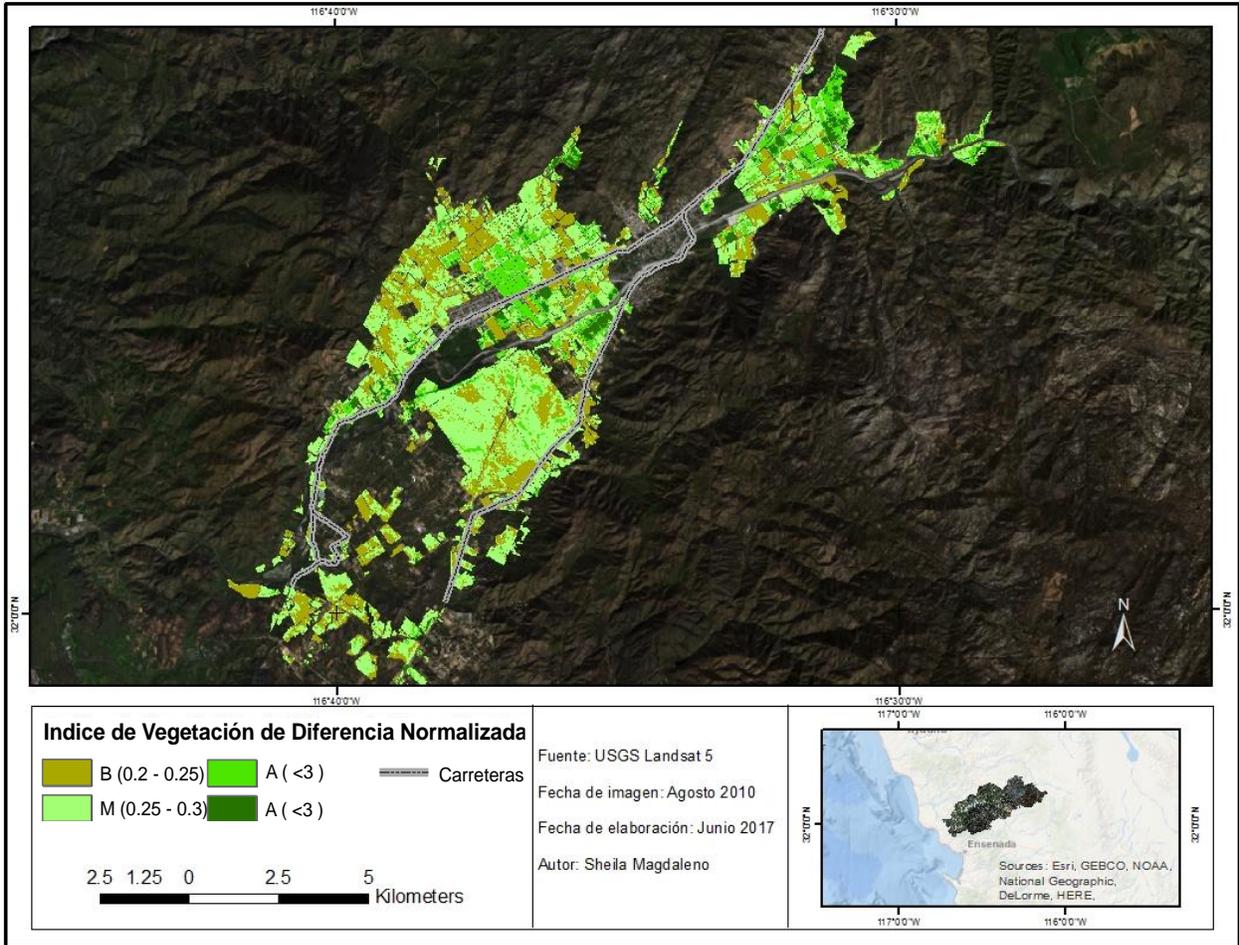


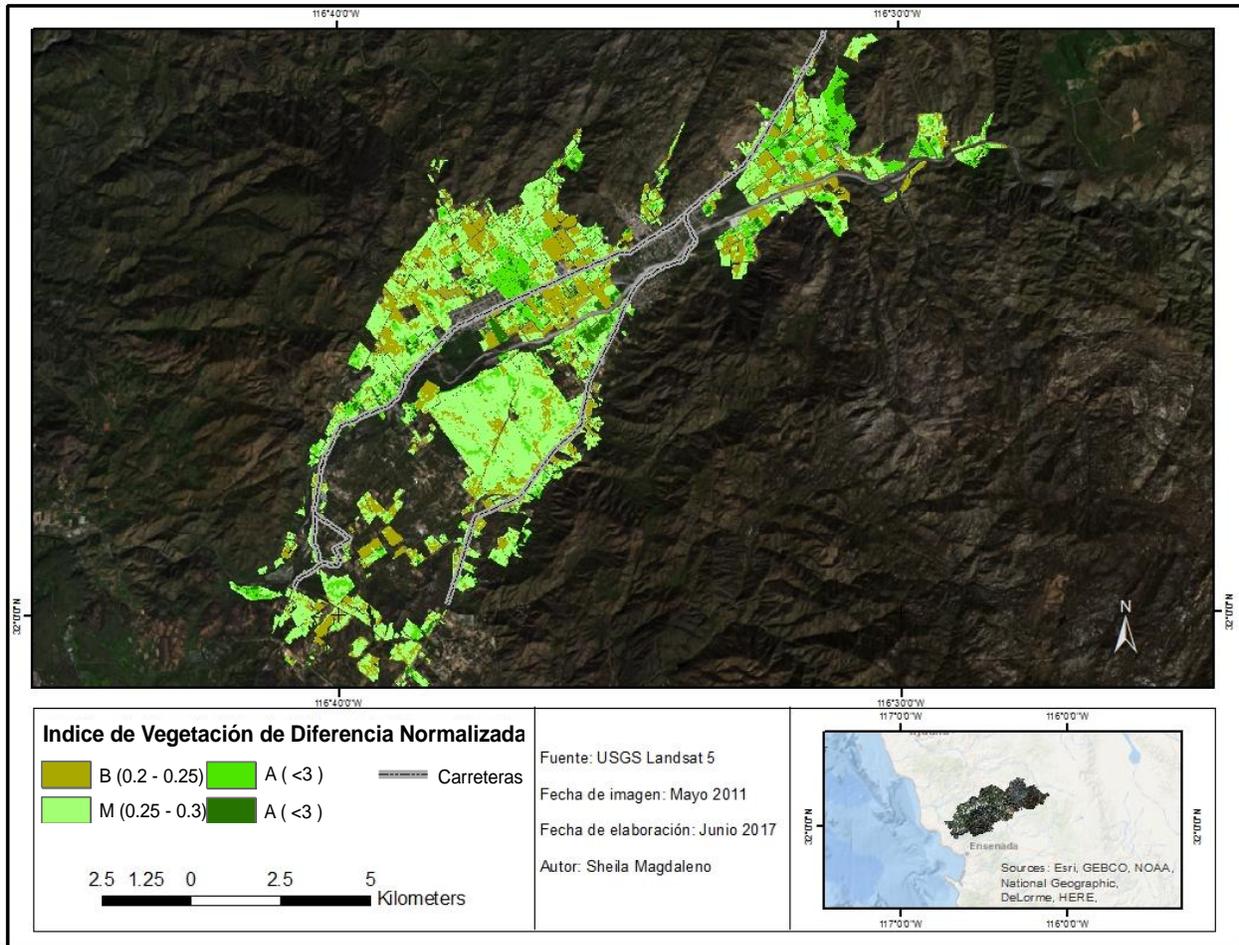


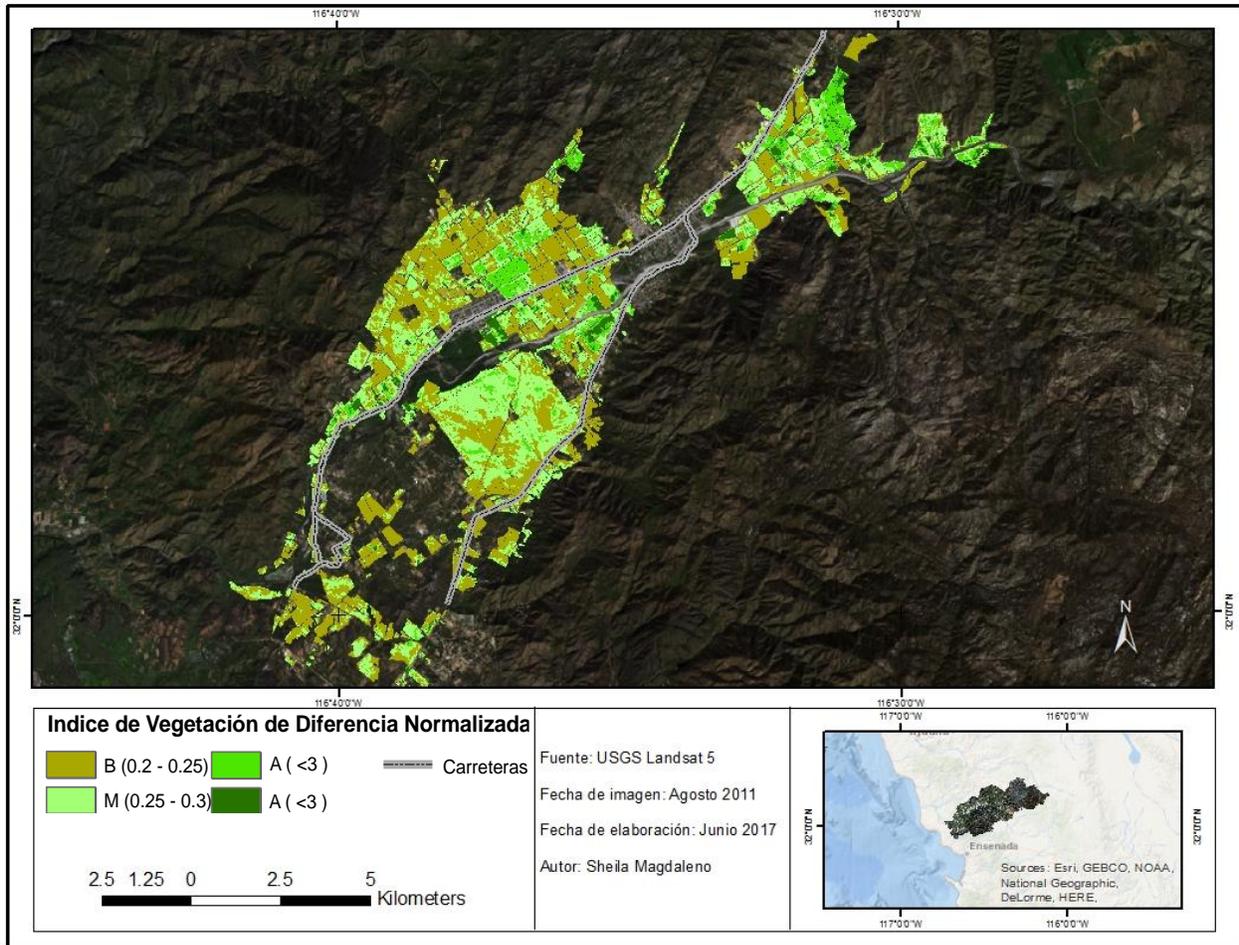


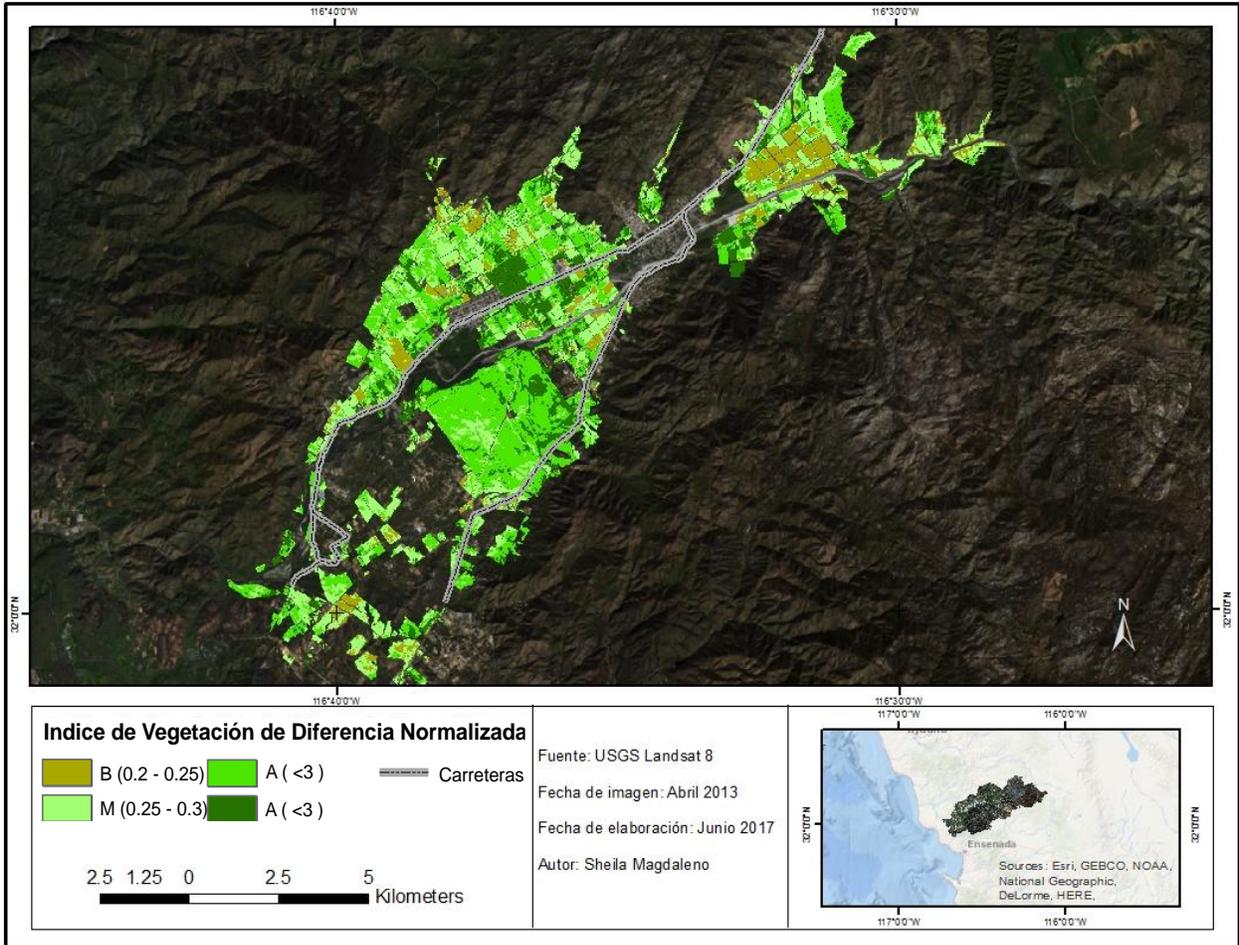


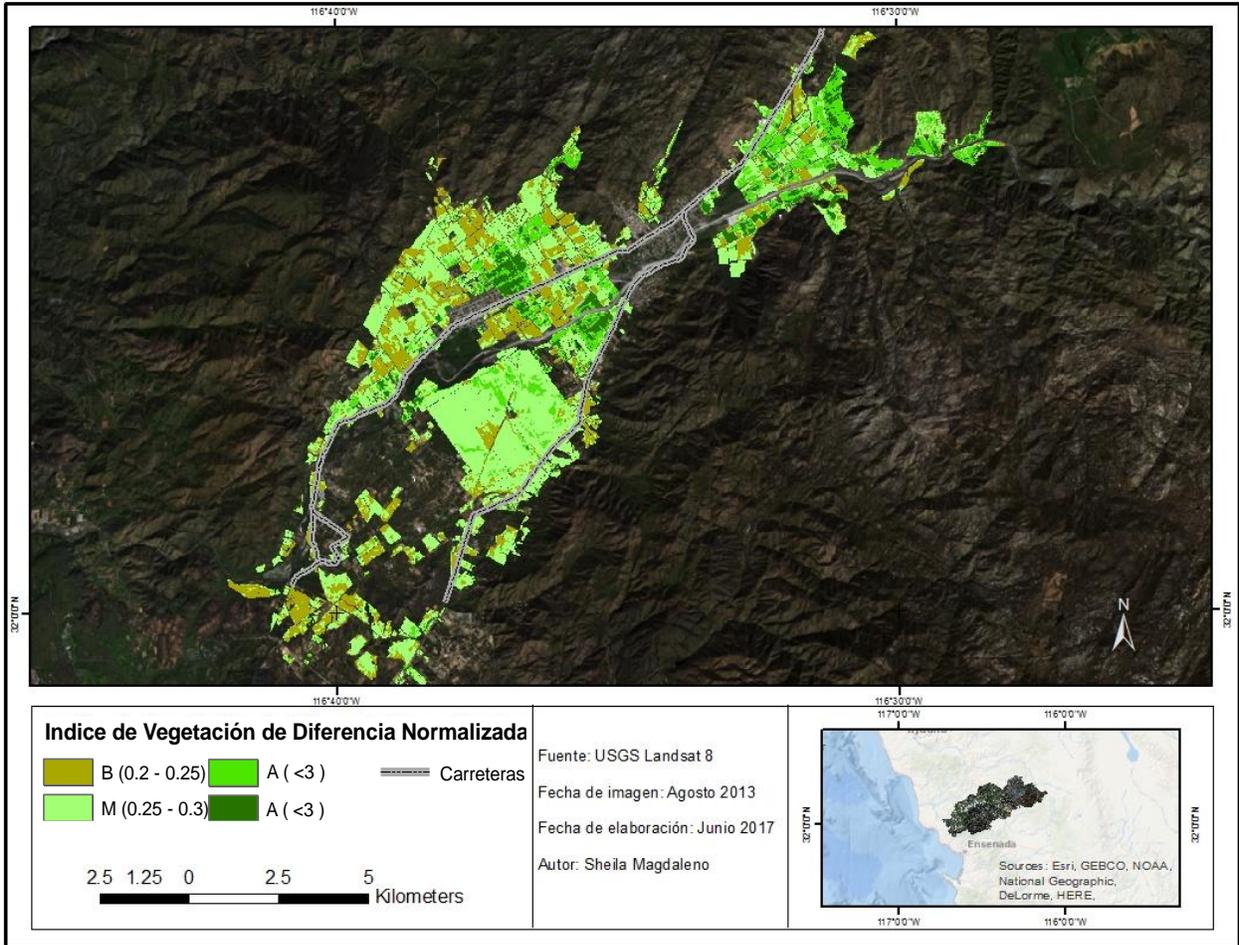


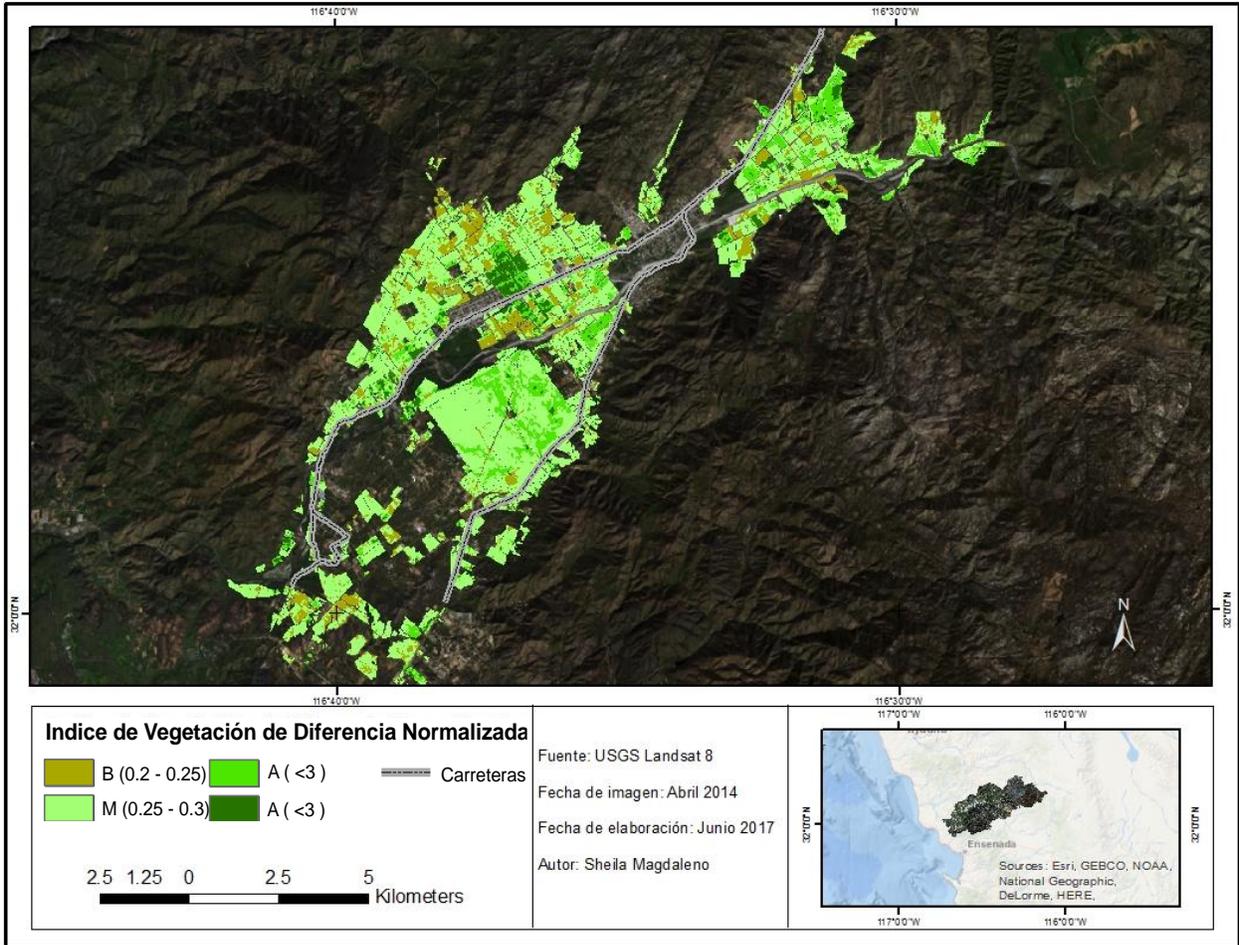


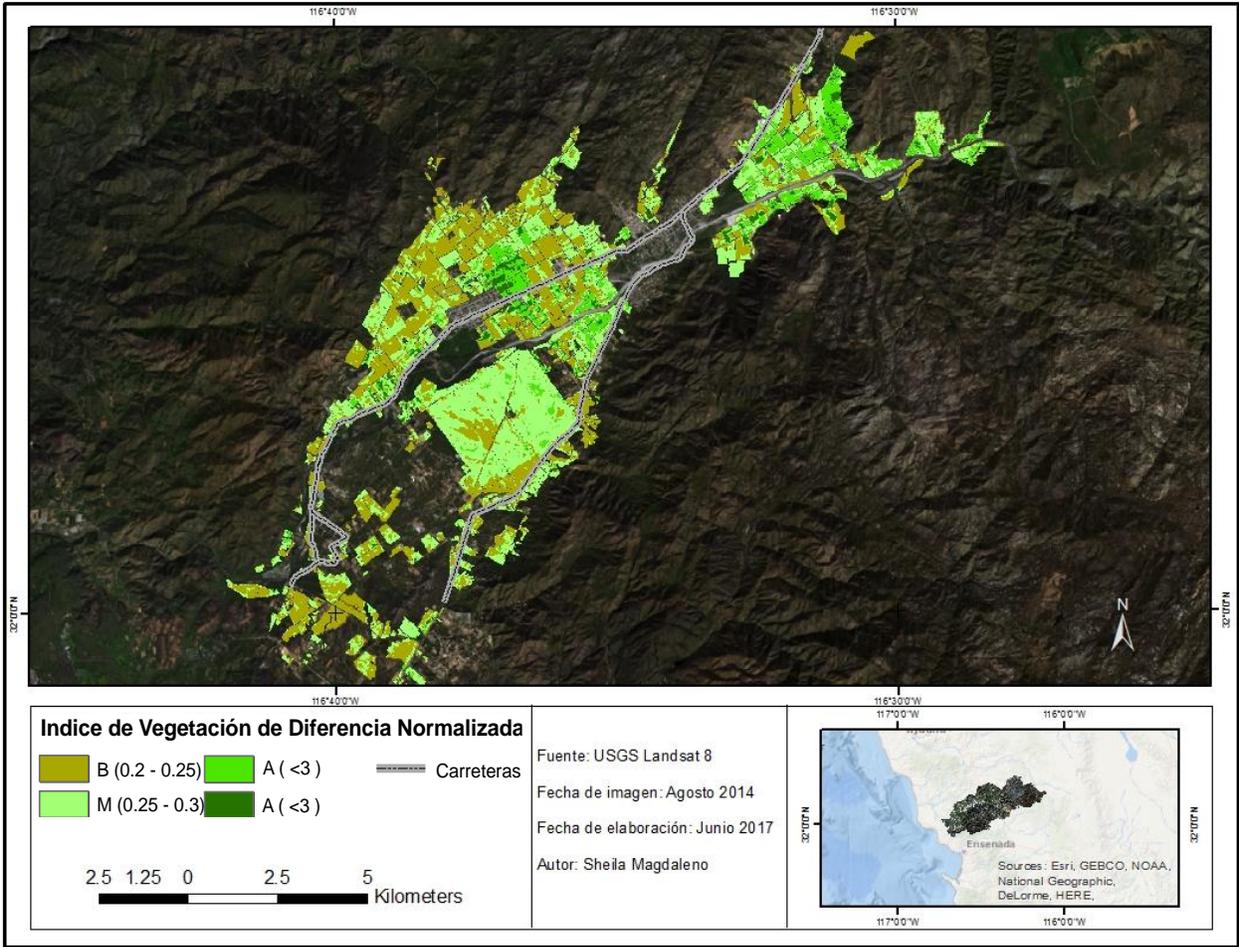


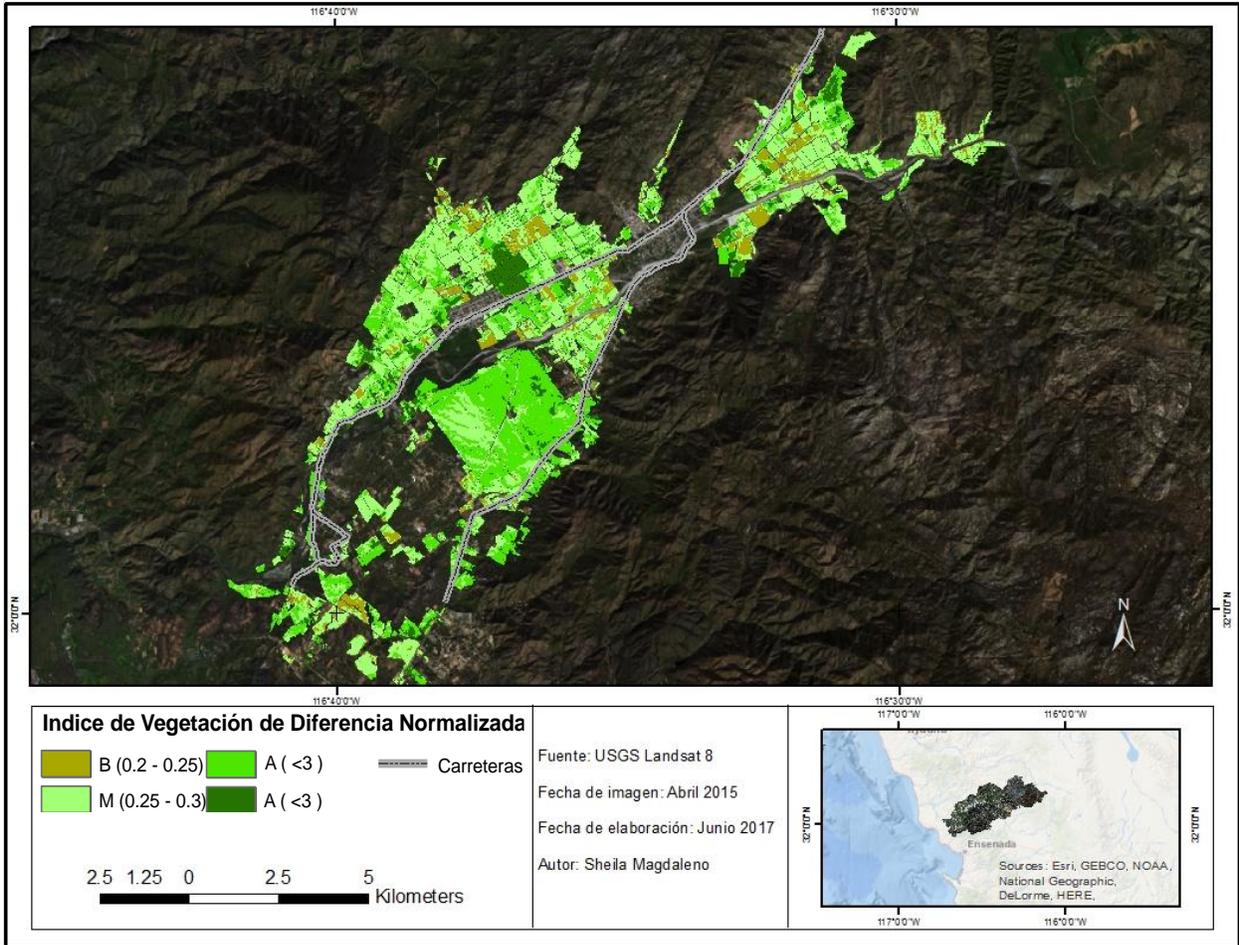


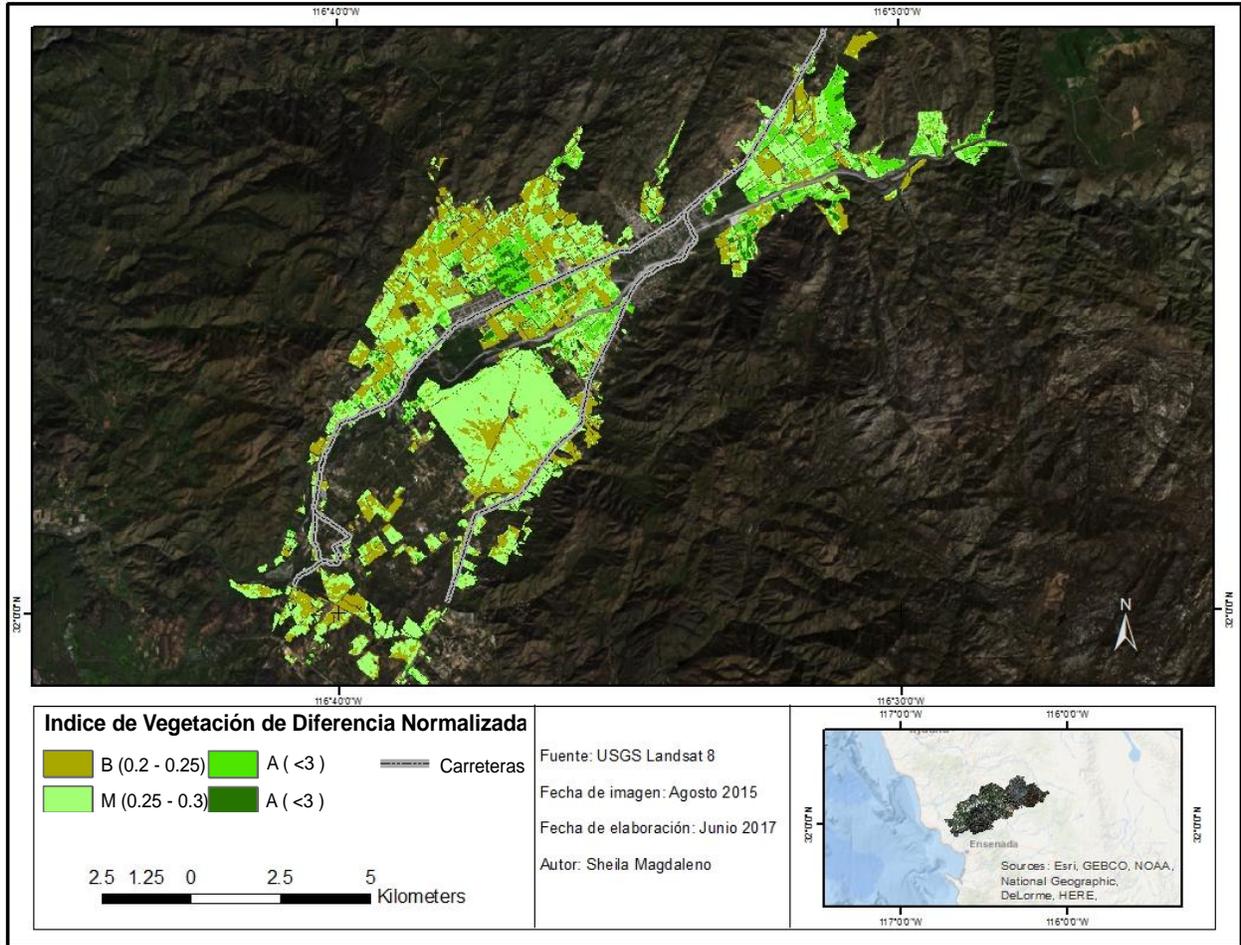


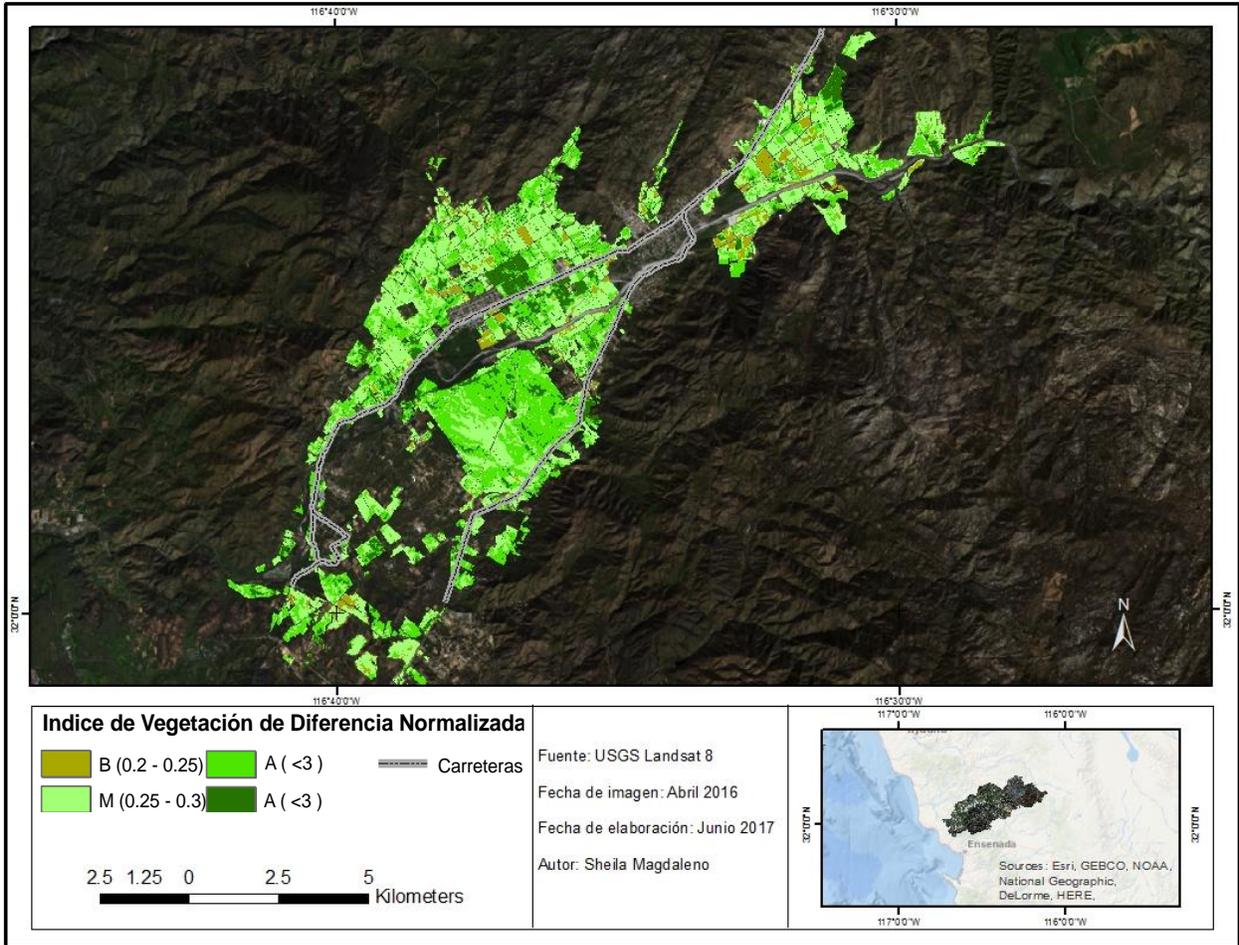


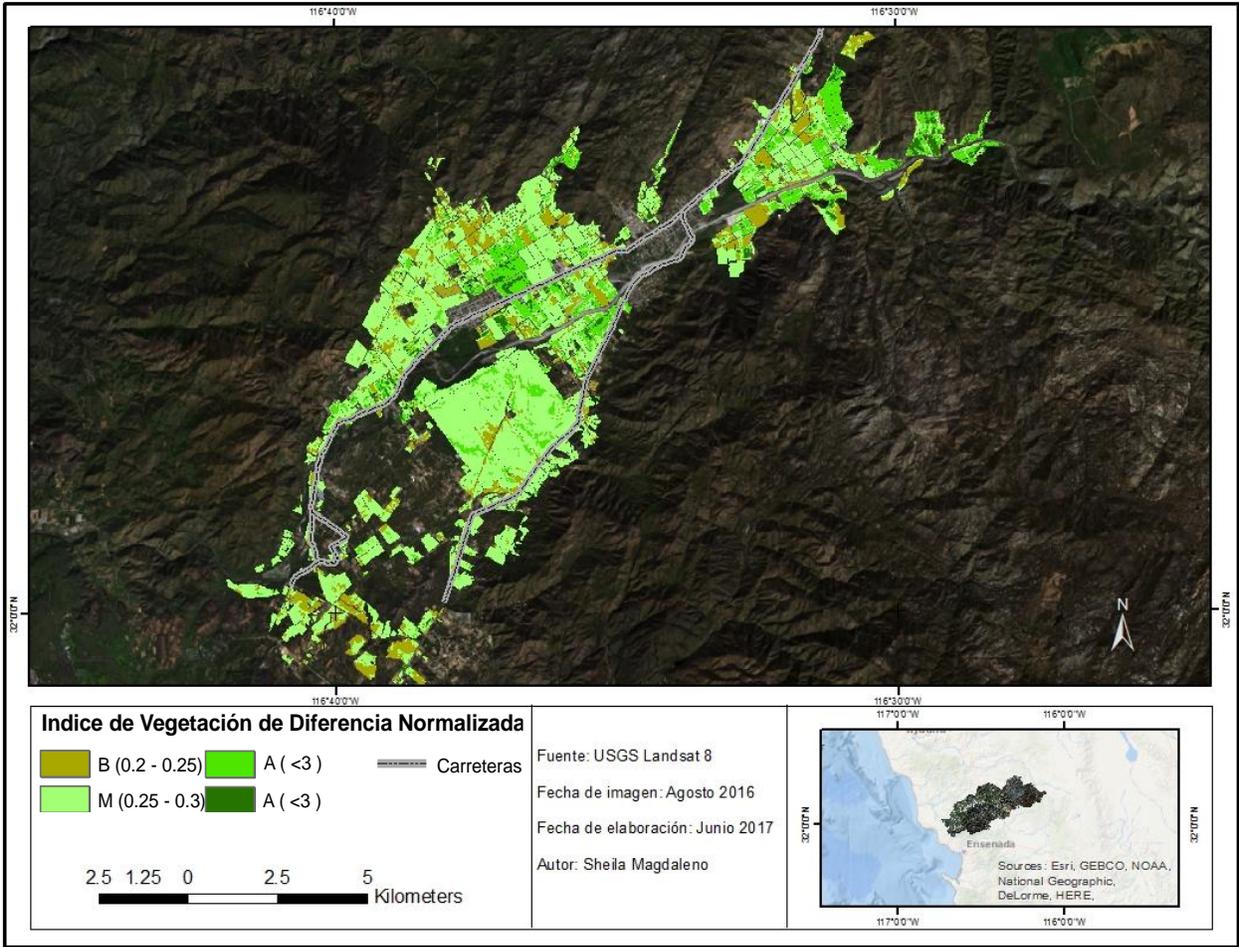












Anexo 7. NDVI correspondiente al cultivo de Olivo y Vid durante primavera y verano de la última década.
 Fuente: Elaboración propia.

