



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA
VEGETACIÓN EN BAJA CALIFORNIA SUR, CON
ÉNFASIS EN ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología de Zonas Áridas)

P r e s e n t a

David Gómez Gallardo

La Paz, Baja California Sur, enero de 2019

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 13:00 horas del día 21 del mes de Enero del 2019, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Variación espacial y temporal de la vegetación en Baja California Sur, con énfasis en Áreas Naturales Protegidas"

Presentada por el alumno:

David Gómez Gallardo

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Ecología de Zonas Áridas**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

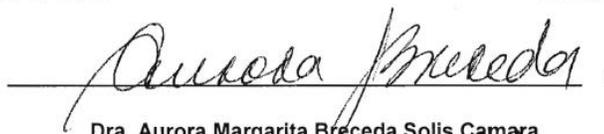
LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Co-Director de Tesis



Dr. Alfredo Ortega Rubio
Co-Director de Tesis



Dra. Aurora Margarita Breceda Solis Camara
Tutor



Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

Conformación de Comités

Comité tutorial

Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Director de tesis

Dr. Alfredo Ortega Rubio
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Director de tesis

Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Tutor de tesis

Comité Revisor de tesis

Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Dr. Alfredo Ortega Rubio
Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara

Jurado de examen

Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Dr. Alfredo Ortega Rubio
Dra. Aurora Margarita Breceda Solís Cámara

Suplente

Dr. César Augusto Salinas Zavala

Resumen

Con el fin de comprender los patrones de variación de la cobertura vegetal en el estado de Baja California Sur y promover la protección ecológica en la entidad, se analizó la variación espacio temporal de la cubierta vegetal mediante análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Se utilizaron datos MOD13Q1 con resolución espacial de 250m y temporal de 16 días, para calcular el NDVI para el periodo de 2001 al 2016. Utilizando el promedio, estacionalidad, anomalías, tendencia y correlación con series climáticas, este estudio describe las características de la variación espacial y temporal de la vegetación del estado de Baja California Sur. Los resultados mostraron que (1) la cobertura vegetal presenta valores altos de NDVI en la porción sur del estado, en las zonas de mayor elevación (más de 500 msnm) de las serranías presentes a lo largo de la entidad y en los manglares asociados a los canales de la bahía "Magdalena-Almejas", y valores bajos de NDVI en la porción norte del estado y las zonas con elevaciones menores a los 300 msnm; (2) el inicio de la temporada de crecimiento de la vegetación en la entidad es en julio, ya que al ser de clima árido está fuertemente relacionada con las pocas lluvias de verano e invernales, el final de la temporada de crecimiento se presenta entre los meses de marzo y abril, en donde comienza el periodo de estiaje de la vegetación; (3) para el periodo en cuestión, los años 2001, 2002, 2010 y 2011 fueron los que presentaron las mayores anomalías negativas de NDVI, dado que en esos años hubo eventos climáticos "La Niña" intensos, y con el efecto contrario los años 2014 y 2015 son los que presentan mayores afectaciones positivas, dado que en esos años hubo eventos climáticos "El Niño" intensos; (4) la mayoría de la entidad presenta tendencias positivas y neutras, sin embargo, la porción sur, específicamente en los municipios de La Paz y Los Cabos, existe una marcada tendencia negativa, dado que es la zona del estado en donde se concentra la mayoría del crecimiento poblacional, se hace un mayor uso de agua de subsuelo, así como actividades agrícolas, ganaderas, mineras y turísticas; (5) la vegetación en la entidad responde considerablemente a los eventos climáticos de gran escala, siendo "El Niño" el fenómeno que presentó mayor influencia. Los resultados del presente estudio, muestran que las imágenes MODIS son una herramienta eficaz para el monitoreo espacio temporal de la vegetación, tanto a escala regional como global.

Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Co-Director de Tesis

Dr. Alfredo Ortega Rubio
Co-Director de Tesis

Summary

In order to understand the variation patterns of vegetation cover in the state of Baja California Sur and promote ecological protection in the state, the temporal variation of the vegetation cover was analyzed by means of analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). MOD13Q1 data with spatial resolution of 250m and temporal of 16 days were used to calculate the NDVI for the period from 2001 to 2016. Using the average, seasonality, anomalies, trend and correlation with climatic series, this study describes the characteristics of the spatial and temporal variation of vegetation in the state of Baja California Sur. The results showed that (1) the vegetation cover has high NDVI values in the southern portion of the state, in the areas of higher elevation (more than 500 masl) of the mountain ranges present throughout the entity and in the mangroves associated with the channels of the "Magdalena-Almejas" bay, and low NDVI values in the northern portion of the state and areas with elevations lower than 300 masl; (2) the beginning of the vegetation growth season in the state is in July, since the arid climate is strongly related to the few summer and winter rains, the end of the growing season is between months of March and April, where the period of low vegetation begins; (3) for the period in question, the years 2001, 2002, 2010 and 2011 were those that presented the greatest negative anomalies of NDVI, given that in those years there were intense "La Niña" climatic events, and with the opposite effect the years 2014 and 2015 are the ones with the greatest positive effects, given that in those years there were intense "El Niño" climatic events; (4) the majority of the entity presents positive and neutral trends, however, the southern portion, specifically in the municipalities of La Paz and Los Cabos, there is a marked negative trend, given that it is the area of the state where the Most of the population growth, there is a greater use of subsoil water, as well as agricultural, livestock, mining and tourism activities; (5) vegetation in the entity responds considerably to large-scale climatic events, with "El Niño" being the phenomenon that had the greatest influence. The results of the present study show that MODIS images are effective tools for monitoring vegetation, both regionally and globally.



Dr. Raúl Octavio Martínez Rincón
Co-Director de Tesis



Dr. Alfredo Ortega Rubio
Co-Director de Tesis

Dedicatoria

A mi esposa Lilia:
Por darme la dicha de ser padre
y por su apoyo incondicional

Al pequeño David:
Por ser mi motor

¡Los amo!

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. por brindarme un espacio para realizar la maestría.

A CONACyT, por la beca número 614029 otorgada para realizar mis estudios.

A mis padres y hermanos por ser mi base, siempre están en mis pensamientos.

A mis tíos Tania y Ricardo por siempre apoyarme y motivarme.

Al Dr. Raúl Martínez por la guía invaluable que me brindó en este camino y por su amistad.

Al Dr. Alfredo Ortega por sus buenos consejos y sus aportes al trabajo.

A la Dra. Aurora Breceda por las charlas y las críticas que mejoraron mi trabajo.

A mis amigos de la maestría: Judith, Karla, Mariana, Camila, Santiago, Jorge, Arturo, Fernando, Nichole, Salwa y Christian por las charlas y su amistad.

Al Tec. Horacio Sandoval Gómez por todo su apoyo durante la maestría.

Este estudio fue desarrollado con el apoyo económico del Proyecto 293368 de Redes Temáticas de CONACyT, del Proyecto 251919 de Ciencia Básica de CONACyT y del Proyecto 278789 de Red de Monitoreo Fenológico del Noroeste de México de fondo CONACyT-INEGI.

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	iv
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	7
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. HIPÓTESIS	11
5. OBJETIVOS	11
5.1 General.....	11
5.2 Específicos	11
6. MATERIALES Y MÉTODOS	12
6.1 Área de estudio.....	12
6.2 Índice de vegetación de diferencia normalizada	14
6.3 Preprocesamiento de imágenes de satélite	14
6.4 Posprocesamiento de imágenes de satélite	16
6.5 Variabilidad ambiental	18
6.6 Efecto de la variabilidad ambiental en la cobertura vegetal	18
7. RESULTADOS	19
7.1 Promedio general del NDVI	19
7.2 Estacionalidad del NDVI.....	25
7.3 Anomalías del NDVI.....	29
7.4 Tendencia del NDVI.....	31
7.5 Efecto del Clima en el NDVI	35
8. DISCUSIÓN	37
9. CONCLUSIONES	42
9.1. Recomendaciones.....	43
10. LITERATURA CITADA	44

Lista de figuras

Figura 1. Localidades de Baja California Sur (elaboración propia)	13
Figura 2. Procedimiento de pre/post procesamiento (elaboración propia).	15
Figura 3. Histograma de frecuencias de los valores del promedio del NDVI observados en Baja California Sur (elaboración propia).	19
Figura 4. Distribución espacial del promedio de NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	21
Figura 5. Modelo de Elevación Digital para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).	21
Figura 6. Modelo de la temperatura promedio para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).	22
Figura 7. Modelo de la precipitación promedio para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).	22
Figura 8. Distribución espacial del promedio de NDVI en La Reserva de la Biosfera el Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	23
Figura 9. Distribución espacial del promedio de NDVI en La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	24
Figura 10. Estacionalidad del NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	26
Figura 11. Grafica de caja, donde se muestra la información contenida en cada una de las imágenes de estacionalidad. La numeración es en días julianos, ya que la información se encuentra disponible de esta manera (elaboración propia).	26
Figura 12. Modelo de precipitación anual para el Estado de Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).	27
Figura 13. Estacionalidad del NDVI en la reserva de la biosfera El Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	28
Figura 14. Estacionalidad del NDVI en la reserva de la biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	28
Figura 15. Anomalías anuales de NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).	29
Figura 16. Grafica de caja, donde se muestra la información contenida en cada una de las imágenes de anomalías anuales (elaboración propia).	30
Figura 17. Datos de series de tiempo de MEI (Índice Multivariado del ENSO), por sus siglas en inglés) en el periodo comprendido del año 2000 al 2016 (elaboración propia).	30
Figura 18. Valores de tendencia del NDVI para el periodo 2001-2016 en Baja California Sur (elaboración propia).	31
Figura 19. Histograma de frecuencias de los valores de tendencia del NDVI observados en Baja California Sur (elaboración propia).	32

Figura 20. Distribución espacial de la tendencia del NDVI en La Reserva de la Biosfera el Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia). 33

Figura 21. Distribución espacial de la tendencia del NDVI en La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia). 34

Figura 22. Correlación espacial de Baja California Sur y eventos climáticos de gran escala, a) Correlación de Pearson entre las anomalías mensuales del NDVI y el índice multivariado del niño. b) Correlación de Pearson entre las anomalías mensuales del NDVI y el índice Oscilación Decadal del Pacífico (elaboración propia). 36

Lista de tablas

Tabla I. Número de ANP's por categoría en México.	2
Tabla II. ANP's de Baja California Sur.	3

Abreviaturas

IV: Índice de Vegetación.

ANP: Área Natural Protegida.

MEI: Índice Multivariado de El Niño.

PDO: Oscilación Decadal del Pacífico.

ENSO: El Niño Oscilación del Sur.

AVHRR: Radiómetro avanzado de muy alta resolución.

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

MODIS Espectrorradiómetro de imagen de resolución moderada

CONANP: Comisión de Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

LPDAAC: Centro de archivo activo distribuido de procesos terrestres.

WGS84: Sistema Geodésico Mundial 1984.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

BCS: Baja California Sur.

Hdf: Formato de datos jerárquicos.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio aborda la importancia que tiene la variabilidad climática, la topografía y la presión antrópica en las variaciones espacio-temporales de la vegetación de Baja California Sur, haciendo énfasis en dos Áreas Naturales Protegidas (ANP) como sitios de especial interés dada la relevancia que éstas tienen como herramientas para la conservación de la riqueza biológica regional.

La entidad concentra una gran riqueza de especies de plantas vasculares, comunidades vegetales y endemismos (Riemann y Ezcurra, 2007; Rosete *et al.*, 2008). Lo anterior, relacionado con la heterogeneidad de paisajes, su asilamiento, la variedad de climas, la naturaleza ecotonal de la región (que contribuye a la coexistencia de especies de diferente origen) y sus numerosos accidentes geográficos (Riemann, 2005), lo que promueve un mosaico de comunidades que atraviesan un gradiente de vegetación que va de los matorrales xerófilos en el norte, hasta llegar a los bosques de pino-encino en el sur. A lo largo de la entidad se pueden encontrar numerosos tipos de vegetación, la mayoría de ellos asociados a la naturaleza semiárida presente en la región, por lo que el tipo de vegetación dominante es el matorral xerófilo, presente en el 76.5% del territorio, seguido de la vegetación halófila 8.7%, la selva baja caducifolia 5.4%, la vegetación riparia 2.1%, los bosques de pino-encino 0.8%, la vegetación de dunas costeras 0.6% y el manglar con 0.5% (INEGI, 2016).

En México como en muchos países, la principal estrategia para la conservación es la de reservar espacios de interés biológico para su protección. En nuestro país existen diversos tipos de áreas protegidas: federales, estatales, municipales, comunitarias, ejidales y privadas. Las ANP's federales se encuentran bajo la administración de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

(CONANP), institución que cuenta a nivel nacional con 182 ANP's y existen seis diferentes categorías de manejo (Tabla I).

Tabla I. Número de ANP's por categoría en México.

Categoría	Abreviado	Nacional
Reservas de la Biosfera	RB	45
Parques Nacionales	PN	66
Monumentos Naturales	MN	5
Áreas de Protección de Recursos Naturales	APRN	8
Áreas de Protección de Flora y Fauna	APFyF	40
Santuarios	SANT	18
Total		182

Fuente de los datos: CONANP (2017).

Baja California Sur cuenta con 10 ANP's federales que resguardan la riqueza terrestre y marina del estado (Tabla II). De entre ellas destacan las Reservas de la Biosfera "El Vizcaíno" y "Sierra La Laguna" (Fig. 1) por ser las de mayor tamaño en la entidad. La primera, situada al extremo norte del estado, es una de las áreas protegidas terrestres de mayor tamaño en el país y alberga al complejo lagunar Ojo de Liebre y a la laguna San Ignacio. La segunda se encuentra al sur, en la Región del Cabo, se caracteriza por ser la única zona del estado con clima templado subhúmedo y considerarse como una "isla de vegetación" en el entorno árido característico de Baja California Sur (León de la Luz y Domínguez, 2010). El presente trabajo tomará en cuenta sólo estas dos ANP's.

Tabla II. ANP's de Baja California Sur.

Nombre	Categoría de Manejo	Superficie (ha)	Fecha de decreto
Complejo Lagunar Ojo de Liebre	RB	79,328.97	14/01/1972
Cabo San Lucas*	APFyF	3,996.04	29/11/1973
Islas del Golfo de California**	APFyF	374,553.63	02/08/1978
El Vizcaíno*	RB	2'546,790.25	30/11/1988
Sierra La Laguna	RB	112,437.07	06/06/1994
Cabo Pulmo*	PN	7,111.01	06/06/1995
Bahía de Loreto*	PN	206,580.75	19/07/1996
Zona marina del Archipiélago de Espíritu Santo***	PN	48,654.83	10/05/2007
Balandra*	APFyF	2,512.73	30/11/2012
Islas del Pacífico de la Península de Baja California****	RB	1,161,222.97	07/12/2016

*Incluye superficie terrestre y marina. **Su superficie incluye las islas pertenecientes a Baja California Sur, Baja California, Sonora y Sinaloa. ***Incluye sólo superficie marina. ****Incluye superficie terrestre y marina de las islas pertenecientes a Baja California Sur y Baja California. Fuente de los datos: CONANP (2017).

En las últimas cuatro décadas, se ha visto un marcado incremento en el desarrollo y uso de índices de vegetación derivados de sensores remotos. El sentido más básico detrás del desarrollo y uso de esos índices, es que algunas combinaciones algebraicas de bandas espectrales detectadas remotamente, pueden revelar información valiosa respecto a la estructura de la vegetación, el estado de la cobertura vegetal, la capacidad fotosintética, distribución y densidad del follaje, deficiencias minerales y da evidencias de enfermedad por plagas (Hmimina, 2013; Kerr y Ostrovsky, 2003). Un índice es un número que cualifica la intensidad de un fenómeno cuando éste es muy complejo para ser descompuesto en parámetros conocidos. Los índices de vegetación son mediciones cuantitativas que indican el verdor de la vegetación. Estos muestran una mejor sensibilidad que las bandas espectrales individuales para la detección de biomasa (Bannari *et al.*, 1995), por lo que constituyen un método notable para la detección de cambios en el uso del suelo y evaluación de la densidad de la cobertura vegetal.

Los índices de vegetación (IV) permiten distinguir los diferentes tipos de cobertura vegetal gracias a su comportamiento espectral único, en relación con los

elementos del suelo en general (Tucker, 1979), la radiación visible en el rojo (630 - 690nm) es absorbida por la clorofila, mientras la radiación en el infrarrojo cercano (760 - 900nm) es fuertemente reflejada por las estructuras celulares de las hojas. Al examinar la curva de reflectancia general de la vegetación, la diferencia observada entre el rojo y el infrarrojo cercano constituye una variable sensible a la presencia de vegetación verde (Schmidt y Skidmore, 2003). Es por esto que la combinación de estas dos bandas espectrales permite diferenciar vegetación de entre los elementos del suelo, y determinar la biomasa fotosintéticamente activa a través de la densidad de cobertura vegetal (Huete *et al.*, 1985).

Rouse *et al.* (1974) describen por primera vez el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) utilizando observaciones del Earth Resourser Technology Satellite (ERTS-1). Estos autores mostraron que el NDVI es un índice muy sensible a la presencia de vegetación verde. Desde entonces y a la fecha, el NDVI ha sido empleado para describir la dinámica de la cobertura vegetal y es el índice de vegetación más utilizado (Bannari, 1995; Xue y Su, 2017). El NDVI es uno de los índices de vegetación más utilizados a la hora de estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, por lo que es un indicador clave del estado de la vegetación y un parámetro útil en estudios de cobertura vegetal y ha sido ampliamente utilizado en los estudios de teledetección para reflejar la dinámica regional y global de la vegetación (Wang *et al.*, 2014). El NDVI es una variante funcional de la relación entre las bandas “Infrarrojo cercano y Rojo”. El índice se obtiene de la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{IRC - Rojo}{IRC + Rojo} \quad (1)$$

Donde IRC es la reflectancia en el infrarrojo cercano y Rojo en el rojo. El NDVI aprovecha el hecho de que la vegetación verde refleja menos la luz visible y más en el infrarrojo cercano, mientras que la vegetación escasa o menos verde refleja una mayor porción de la luz visible y menos del infrarrojo cercano. El NDVI

combina esas características de reflectancia en una proporción, por lo que es un índice relacionado con capacidad fotosintética. El rango de valores que se obtiene está entre -1 y 1. Sólo los valores positivos corresponden a áreas con vegetación, valores cercanos a 1 representan mayor vigor en la vegetación, valores muy cercanos a 0 representan áreas desprovistas de vegetación y valores negativos suponen cuerpos de agua o nieve (Yengoh *et al.*, 2015).

El NDVI ha sido utilizado ampliamente para describir la variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal, mediante el uso de imágenes de satélite. A la fecha, existen numerosos satélites que orbitan la tierra y que son capaces de medir la reflectancia tanto en la parte visible de la luz como en el infrarrojo cercano. A partir de estas imágenes se calcula el NDVI. El satélite que cuenta con una mayor cobertura temporal del NDVI es AVHRR, mismo que está disponible desde 1978 hasta 2007 con una resolución de 1km.

El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un evento de calentamiento o enfriamiento oceánico a gran escala que ocurre aproximadamente cada 2 a 7 años. Consiste en un debilitamiento y/o fortalecimiento de los vientos alisios del este sobre el Pacífico tropical. Durante la fase cálida del ENSO, el Pacífico tropical oriental se caracteriza por tener anomalías positivas de temperatura superficial del mar y negativas en la presión a nivel del mar, mientras que en el Pacífico tropical occidental pasa lo contrario. Correspondiendo a esta distribución se encuentran las anomalías ecuatoriales del viento del oeste en el Pacífico central y las anomalías del viento del este en el extremo occidental del Pacífico (Erasmí *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012; Wang y Fiedler, 2006).

Este trabajo tiene como objetivo principal describir la variación espacio-temporal de la cobertura vegetal de Baja California Sur durante el periodo 2001-2016, haciendo énfasis en ANP. El trabajo incluye la descripción del promedio del NDVI registrado durante el periodo de estudio para caracterizar la cobertura vegetal en

el estado, así como su variabilidad estacional, la tendencia y su relación con cambios ambientales registrados en diferentes escalas temporales. Los resultados obtenidos en este trabajo podrían aplicarse para la toma de decisiones en el manejo de las áreas naturales protegidas, así como para generar conocimiento básico de los cambios espaciales y temporales de la cobertura vegetal en el estado.

2. ANTECEDENTES

El NDVI ha sido ampliamente utilizado a nivel global y a diferentes escalas espaciales (continentales, regionales y locales) para describir cambios espaciales y temporales en la cobertura vegetal. de Jong *et al.* (2011), utilizaron imágenes de satélite del sensor AVHRR en el periodo 1981-2006 para describir tendencias monotónicas de incremento o decremento de la cobertura vegetal, sugiriendo que las tendencias del NDVI pueden ser utilizadas para muchos propósitos, como; la medición de la respuesta ecológica ante el cambio climático, cambios fenológicos, estatus de cultivos, cambios en la cobertura vegetal y desertificación. Sin embargo, también hacen énfasis en la existente dificultad para atribuir una causa-efecto en las tendencias de la vegetación, dado que las variaciones en la vegetación son impulsadas por varios factores, incluidos ciclos climáticos y prácticas de manejo.

Con el fin de comprender los patrones de la cobertura vegetal en la cuenca del río amarillo en China, Jiang *et al.* (2015) utilizaron datos de series de tiempo de 11 años, para describir las características de la distribución espacial del NDVI. Encontrando que ciertos tipos de vegetación, como bosques, pastizal inundable y los cultivos tienen un alto valor de NDVI, mientras que los pastos tienen un valor bajo. Posteriormente hacen una descripción general de la cobertura vegetal en la cuenca, señalando a las zonas de mayor altitud como las áreas con valores más altos de NDVI y el efecto contrario en zonas bajas. Mencionan que para el periodo de estudio (2000 a 2010) los valores promedio de NDVI, fluctúan en el rango de 0.3 a 0.4 para toda la cuenca.

Hmimina *et al.* (2013), describen cambios estacionales de la vegetación en un bosque de robles en Fontainebleau, Francia. Utilizando mediciones de NDVI de satélite e *in situ* y la definen como fenología. En dicho trabajo describen eventos estacionales, como el brote y senescencia de las hojas y los asocian a los valores

del NDVI. En total describen seis eventos fenológicos, tres en primavera y tres en otoño, los primeros relacionados con el brote de hojas y el segundo con la senescencia de las hojas. Estos autores sugieren que los cambios fenológicos son resultado de la adaptación de las plantas a las limitaciones climáticas.

Para la península de Baja California, Mercado (2001), en su tesis de maestría, utilizó imágenes de satélite del sensor AVHRR para el periodo de 1981 a 2000 para hacer una regionalización de la vegetación de la península, con respecto a los valores promedio de NDVI, una técnica multivariada de K-medias y regionalizaciones previas. Identificando 6 grupos o regiones, para las que describe patrones estacionales y lo relaciona con las comunidades vegetales dominantes para cada grupo. Adicionalmente, realizó un análisis de correlación cruzada entre los datos de series de tiempo y el Índice de Oscilación del Sur, obteniendo una relación positiva general entre las dos variables.

En el noroeste de México, Salinas (2003) en su tesis de doctorado, evaluó la respuesta de la vegetación a la variabilidad climática, para lo cual utilizó los rendimientos de trigo invernal y el NDVI derivado del sensor AVHRR para el periodo 1981 a 2000, encontrando ocho patrones estacionales asociados a los tipos de vegetación dominante de cada región. También menciona que la variación interanual de los ocho grupos muestran señales armónicas probablemente asociados al fenómeno climático ENSO. Adicionalmente, realizó una correlación entre las series de tiempo de NDVI y un indicador del ENSO, concluyendo que existe una respuesta diferencial, dado que sus resultados mostraron que la relación entre el ENSO y el NDVI es más fuerte y persistente en los patrones de vegetación asociados a la región mediterránea. Finalmente, presenta los resultados derivados de un análisis de probabilidad condicional entre las dos fases del ENSO (cálida-fría) y dos condiciones del NDVI (valores altos-valores bajos), obteniendo que cuando se presenta la fase cálida del ENSO (El Niño) se registran valores elevados de NDVI en la época de estiaje del siguiente año, con una

probabilidad mayor al 70%, y por el contrario, cuando la fase negativa del ENSO (La Niña) se presentan valores bajos de NDVI en la época de estiaje, con una probabilidad mayor al 80%. Lo anterior, lo asocia con un fenómeno ya reportado previamente, llamado “memoria de hidratación de las semillas”.

Para la Baja California Sur, Salinas *et al.* (2017) utilizaron imágenes del sensor MODIS instalado en el satélite TERRA, para analizar el promedio y la tendencia del NDVI durante el periodo 2001 a 2015. Describen como un 67% de la entidad presenta valores de NDVI promedio de entre 0.1 y 0.3, valores de NDVI consistentes con lo reportado en la literatura para zonas áridas. Adicionalmente, mencionan que es en las zonas de mayor altitud y con más cobertura vegetal en las que es posible encontrar valores superiores a 0.5 y que la Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna tiene los valores máximos (>0.8) que se pueden encontrar en la entidad. Pese a lo anterior, al analizar la tendencia encontraron que en esa misma reserva se observan valores negativos, indicativo de pérdida en el vigor de la vegetación. Estos autores sugieren, que los valores de tendencia negativa se corresponden con las zonas de mayor densidad poblacional y las zonas con más desarrollo turístico alrededor de la reserva.

3. JUSTIFICACIÓN

Evaluar y entender los efectos que los cambios ambientales y antropogénicos producen sobre la distribución y la dinámica de la vegetación es cada vez más importante para impulsar políticas de conservación y manejo de ecosistemas naturales. En años recientes se han desarrollado diversos estudios alrededor del mundo, que tienen como fin el entender y mitigar, los efectos negativos en áreas naturales causados por el cambio climático, la reducción de la biodiversidad y la degradación del hábitat. Sin embargo, ésta no es una tarea trivial, debido a que los ecosistemas son complejos y experimentan cambios constantes en diferentes escalas de tiempo por razones multidimensionales.

Baja California Sur es el estado con menor densidad poblacional en México, sin embargo, el acelerado crecimiento poblacional que se ha registrado en los últimos años, principalmente en los municipios de La Paz y Los Cabos, han generado constantes cambios de uso de suelo y con ello se ponen en riesgo ecosistemas presentes en esta región. Es por esto, que existe una necesidad de generar conocimiento científico de alta calidad para entender los cambios que ocurren en la cobertura vegetal. En este estudio se propone hacer uso de imágenes de satélite con índices de vegetación para tener una visión sinóptica de la dinámica y variabilidad espacio-temporal de la cobertura vegetal en Baja California Sur. Los resultados derivados de este trabajo podrán ser utilizados para desarrollar políticas de conservación y manejo sustentable que permitan mitigar efectos adversos ocasionados por el cambio de uso de suelo o por el cambio climático

Pregunta de investigación

¿Cuáles han sido los cambios de la cobertura vegetal en Baja California Sur y sus Áreas Naturales Protegidas en el periodo analizado?

4. HIPÓTESIS

Debido a que BCS es el estado con menor densidad poblacional, se espera que los cambios en la cobertura vegetal en el estado y en sus Áreas Naturales Protegidas estén principalmente influenciados por cambios climáticos de gran escala.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar la variación espacial y temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada en Baja California Sur durante el periodo 2001-2016.

5.2 Específicos

Para el periodo comprendido del año 2001 al 2016:

- Describir el promedio del índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Describir la estacionalidad del índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Describir las anomalías del índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Describir la tendencia del índice de vegetación de diferencia normalizada.
- Evaluar el efecto de eventos climáticos de gran escala en el índice de vegetación de diferencia normalizada.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

Baja California Sur está ubicado en la región noreste del país, en la porción sur de la península de Baja California, limita al norte con el estado de Baja California, al este con el mar de Cortés, al sur y oeste con el océano Pacífico. Se extiende de los 22°52' a 28° de latitud norte y de los 109°25' a los 115°05' de longitud oeste, a través de más de 670 km de largo y entre 230 y 45 km de ancho. La entidad se caracteriza por tener serranías y planicies costeras. A lo largo de la entidad corren sistemas montañosos con dirección Norte-Sur, en las zonas norteñas y centrales presentan pendientes suaves por el Oeste y escarpadas hacia el Golfo de California, se prolonga hasta el mar y tiene una altitud media de 600m y está formada por rocas de origen volcánico. Una amplia planicie costera por el occidente, con 40 km de anchura media, permite la formación de extensos llanos como los de Santa Clara, Berrendo, la Magdalena e Hiray, de rocas sedimentarias marinas, en especial calizas. El pico más alto en la entidad se encuentra en la Sierra La Laguna, que llega hasta los 2000 msnm, sin embargo, en la entidad existen varias formaciones montañosas importantes ecológica y culturalmente, como son: Sierra de Guadalupe, Sierra de San Francisco, Sierra de Santa Clara, Sierra de San José de Castro, Sierra La Giganta y Sierra de San Pedro.

Con 712,029 habitantes, Baja California Sur es el segundo estado menos poblado de México (sólo por debajo de Colima), con una extensión de 73,922 km² es el noveno estado más extenso y con 8.62 hab/km² es el estado menos densamente poblado del país (BCS, 2015). En el periodo de 2010 a 2017, la población en la entidad prácticamente se ha duplicado, pasando de 424mil a más de 800mil, lo anterior, debido a un marcado incremento económico, sobre todo en los municipios de La Paz y Los Cabos, en donde se concentra el 78% de la población de la entidad.

En el estado dominan los matorrales, sin embargo, también es posible encontrar manglar, selva baja caducifolia y bosques de pino-encino. Tiene clima semidesértico; muy seco (92%), seco y semiseco (7%), templado subhúmedo (1%), la precipitación promedio anual en el estado es menor a 200mm y la temperatura oscila entre los 35 °C y 9 °C (INEGI, 2016).

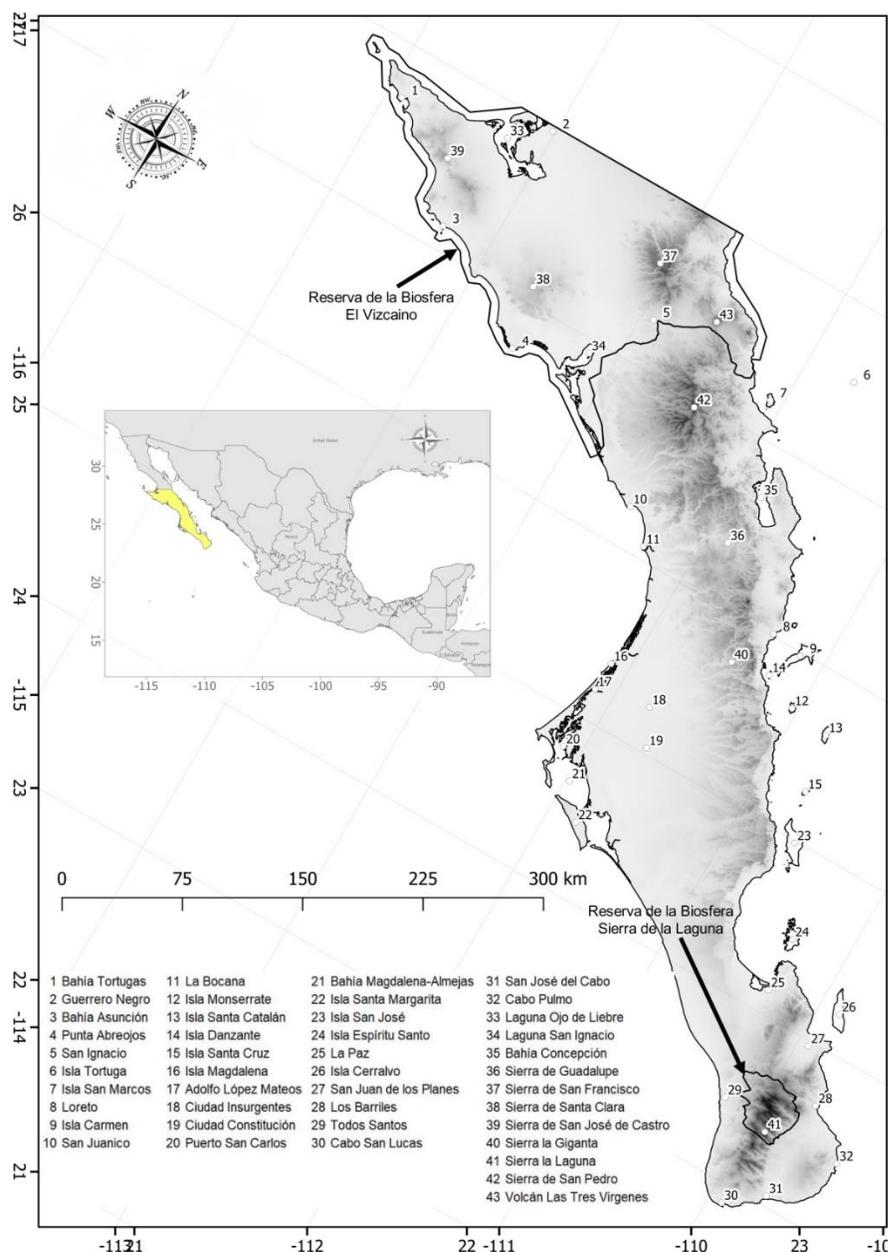


Figura 1. Localización de Baja California Sur y puntos de referencia (elaboración propia).

6.2 Índice de vegetación de diferencia normalizada

Los datos de NDVI se adquirieron de imágenes de satélite obtenidos con el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite TERRA. Están disponibles de manera gratuita en el servidor de Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC, <https://lpdaac.usgs.gov>). Para este estudio se utilizó el producto MOD13Q1 que cuenta con una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días, es decir, cada imagen representa el promedio del NDVI registrados en 16 días.

6.3 Preprocesamiento de imágenes de satélite

El producto MOD13Q1 se encuentra disponible para su descarga en un formato específico llamado formato de datos jerárquicos (hdf, por sus siglas en inglés). Cada archivo hdf cuenta con 12 “capas”, dentro de las cuales se encuentra el NDVI en la primera capa de este archivo. La base de datos MOD13Q1 contiene información de NDVI de todo el mundo, sin embargo, debido a su gran tamaño LPDAAC pone a disposición estos datos a manera de “mosaicos”, que representan un área de 0.25 km². Los datos de NDVI correspondientes a Baja California Sur se encuentran almacenados en dos mosaicos (h07v06 y h08v06), por lo que fue necesario descargar ambos para posteriormente combinarlos, recortarlos y reproyectarlos a WGS84. En total se descargaron 368 archivos hdf de cada uno de los mosaicos, para cubrir el periodo 2001-2016. Tanto el preprocesamiento como el postprocesamiento de las imágenes de satélite fueron realizados con lenguaje de programación R (R Core Team, 2017).

Para extraer los datos del NDVI los archivos hdf fueron procesados con la librería *gdalUtils* (Greenberg y Mattiuzzi, 2018). Los datos de NDVI tienen originalmente una proyección espacial muy específica (+proj=sinu +lon_0=0 +x_0=0 +y_0=0 +a=6371007.181 +b=6371007.181 +units=m +no_defs), por lo tanto, se utilizó la librería *raster* (Hijmans, 2016) para reproyectar los datos a WGS84. Después de

reproyectar los datos, se recortó el área de estudio utilizando el polígono de la entidad que se descargó desde el servidor del INEGI (INEGI, 2015). En la figura 2 se esquematiza el procedimiento para obtener los valores del NDVI de los archivos hdf.

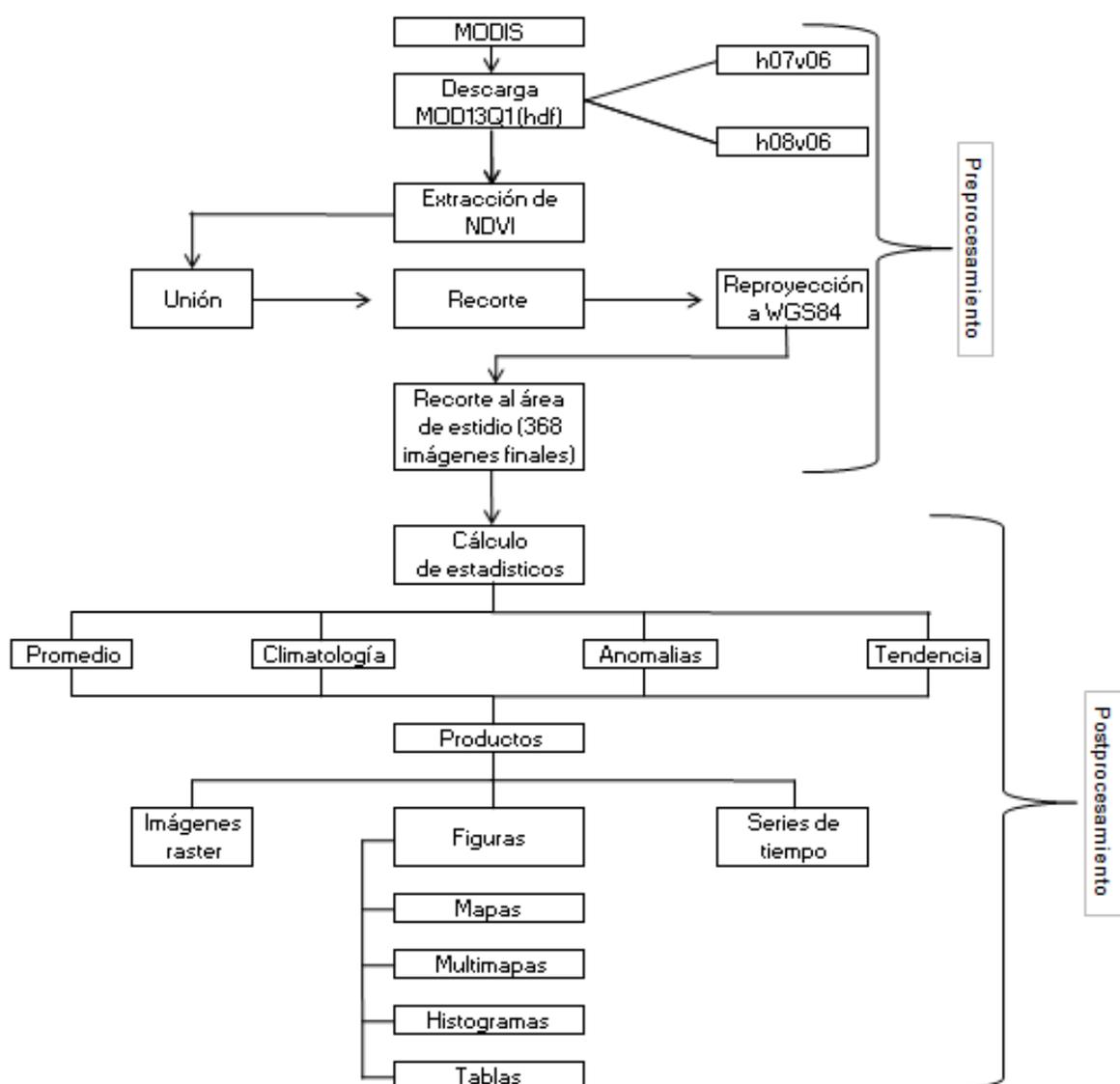


Figura 2. Procedimiento de pre/post procesamiento (elaboración propia).

6.4 Posprocesamiento de imágenes de satélite

A partir de las imágenes de satélite con los valores de NDVI correspondientes a Baja California Sur, se calculó el promedio general del NDVI utilizando la siguiente ecuación:

$$\overline{NDVI} = \frac{\sum NDVI}{n} \quad (2)$$

Donde NDVI es la sumatoria del i-ésimo día juliano (cada 16 días) y del j-ésimo año. El promedio general del NDVI se utilizó para describir la variabilidad espacial de este índice de vegetación en la entidad, haciendo énfasis en las Áreas Naturales Protegidas.

Para describir la variación intra-anual (estacional) del NDVI se calcularon los promedios del NDVI para cada uno de los días julianos (cada 16 días). Estos promedios se utilizaron para describir la “estacionalidad” de la cobertura vegetal, es decir, la dinámica de la vegetación a escala estacional. El promedio estacional del NDVI se calculó con la siguiente ecuación:

$$\overline{NDVI}_i = \frac{\sum NDVI_i}{n_i} \quad (3)$$

Donde NDVI es el promedio estacional del i-ésimo día juliano (cada 16 días).

Para describir la variación interanual del NDVI se calcularon los promedios anuales del NDVI. Para esto se utilizó la siguiente ecuación:

$$\overline{NDVI}_j = \frac{\sum NDVI_j}{n_j} \quad (4)$$

Donde NDVI_j es el promedio anual del NDVI del j-ésimo año.

Adicionalmente, se calcularon las anomalías anuales del NDVI para el periodo de estudio. Las anomalías representan diferencias del NDVI con respecto al promedio general y se utiliza para describir cambios interanuales en el NDVI que se presentaron en el periodo de estudio. La siguiente ecuación fue utilizada para calcular las anomalías anuales del NDVI:

$$NDVI_{anom_j} = NDVI - \overline{NDVI}_i \quad (5)$$

Donde $NDVI_{anom_j}$ representa las anomalías anuales del NDVI, $NDVI_j$ el promedio anual y $NDVI$ el promedio general.

Para evaluar la variabilidad espacio-temporal del NDVI se calcularon las anomalías del NDVI de cada una de las fechas analizadas. Para calcular las anomalías del NDVI se utilizó la siguiente ecuación:

$$NDVI_{anom_ij} = NDVI - \overline{NDVI}_{ij} \quad (6)$$

Donde $NDVI_{anom_ij}$ representa las anomalías del NDVI del i -ésimo día juliano (cada 16 días) y del j -ésimo año.

Para describir la tendencia de la cobertura vegetal en Baja California Sur registrada durante el periodo 2001-2016 se utilizó un modelo de regresión lineal, para describir la tendencia lineal de los valores del NDVI. En el modelo de regresión lineal la variable dependiente es el NDVI y la variable independiente es el tiempo. De tal manera, que la pendiente del modelo representa la tasa de cambio en el NDVI por año. El modelo de regresión lineal empleado para esto puede representarse con la siguiente ecuación:

$$y = \alpha + \beta X \quad (7)$$

6.5 Variabilidad ambiental

Para describir la variabilidad ambiental registrada en Baja California Sur durante el periodo 2001-2016 se utilizaron índices climáticos que integran tanto procesos atmosféricos como oceánicos y que están estrechamente relacionados con cambios en la precipitación. El índice multivariado del Niño (MEI, por sus siglas en inglés) y el índice Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés).

Adicionalmente se descargaron las climatologías (promedios mensuales) de la precipitación y la temperatura correspondientes a Baja California Sur del servidor de Wordclim. Las climatologías fueron utilizadas en conjunto con los promedios estacionales y el promedio general del NDVI para describir la cobertura vegetal y el efecto de estas variables ambientales en su distribución espacio-temporal.

6.6 Efecto de la variabilidad ambiental en la cobertura vegetal

Se aplicaron pruebas de correlación entre las series de tiempo de los índices climáticos y las series de tiempo del NDVI para determinar el efecto de fenómenos climáticos en la variabilidad ambiental de la cobertura vegetal. Valores altos del coeficiente de correlación absoluta (>0.5) indican una relación lineal entre los índices climáticos y el índice de vegetación, por el contrario, valores bajos de correlación absoluta (<0.5) indican una baja o nula relación lineal entre estas variables.

7. RESULTADOS

7.1 Promedio general del NDVI

Los valores promedio del NDVI registrados en Baja California Sur durante el periodo 2001-2016, muestran que existe una alta heterogeneidad espacial en la cobertura vegetal en el estado. Particularmente, se observó que la mayor parte presenta valores de entre 0.1 y 0.4 (67%) lo que es consistente en un ambiente semiárido dominado por matorrales como el existente en Baja California Sur. Los valores del NDVI entre 0.4 y 0.8 se registraron en zonas con mayor densidad de vegetación, tales como manglares, bosques (pino y encino) y otros tipos de vegetación con alta densidad foliar como la selva baja caducifolia, estos representan el 7% del estado (Fig. 3).

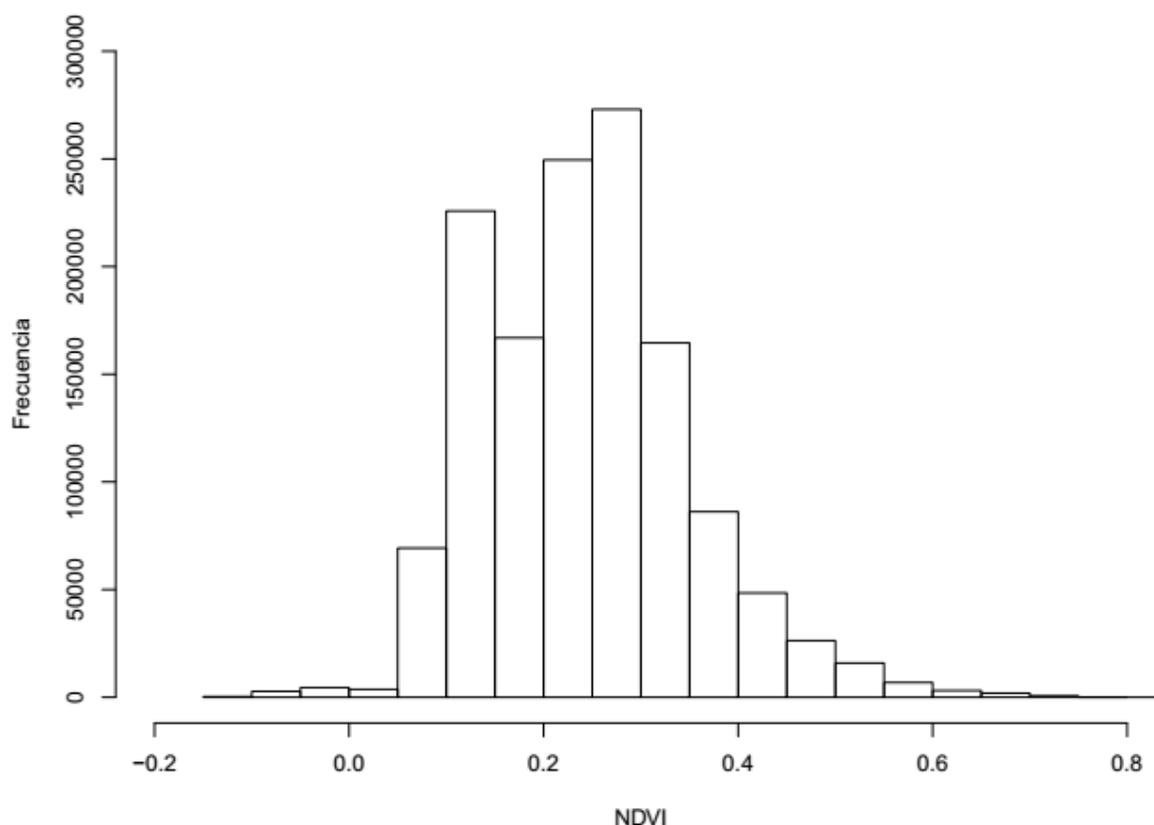


Figura 3. Histograma de frecuencias de los valores del promedio del NDVI observados en Baja California Sur (elaboración propia).

En la figura 4 se muestra la distribución espacial del promedio del NDVI registrado durante el periodo 2001-2016. De manera general, se aprecia que los valores más altos del NDVI se presentan en una franja paralela al Golfo de California y en la porción sur del estado, mientras en la porción noroeste y la franja paralela al Océano Pacífico presenta valores bajos del NDVI. Las zonas con valores elevados de NDVI (>0.4) se presentaron en las áreas con una altitud mayor a 500 msnm (Fig. 5), con temperaturas promedio de 19°C (Fig. 6) y precipitación promedio mayor a 25mm (Fig. 7). Las zonas con valores bajos de NDVI, se registraron en las áreas de menor altitud, que van de los 0 a 300 msnm (Fig. 5), de clima seco y muy seco con temperaturas promedio de 23°C (Fig. 6), precipitaciones promedio menores a 15 mm (Fig. 7) y con matorral xerófilo como vegetación dominante.

Particularmente, se encontraron dos grandes regiones del estado con valores de NDVI relativamente altos (0.2 – 0.55), la primera ubicada en la parte noreste y centro del estado. Esta región se conoce como el corredor de las sierras “Guadalupe y La Giganta”. La segunda en la parte sur del estado, particularmente en la reserva de la biosfera Sierra La Laguna y zonas aledañas a esta, donde se presentaron valores del NDVI entre 0.4 y 0.7. Otra región con valores altos de NDVI (0.4 – 0.8) se encuentra en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, donde abundan los manglares.

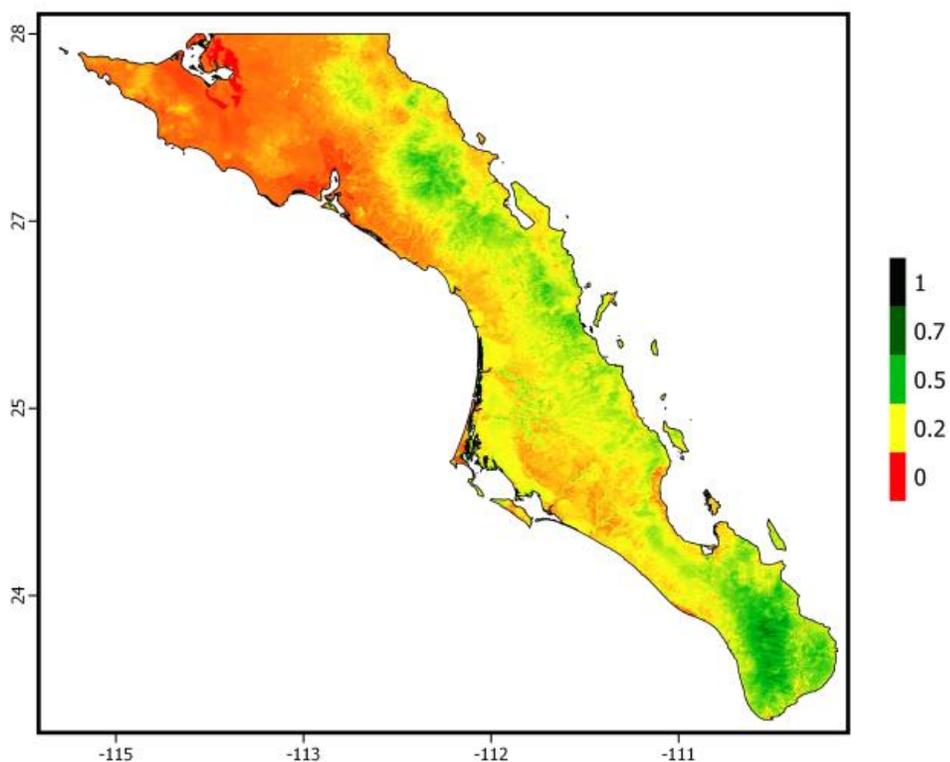


Figura 4. Distribución espacial del promedio de NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

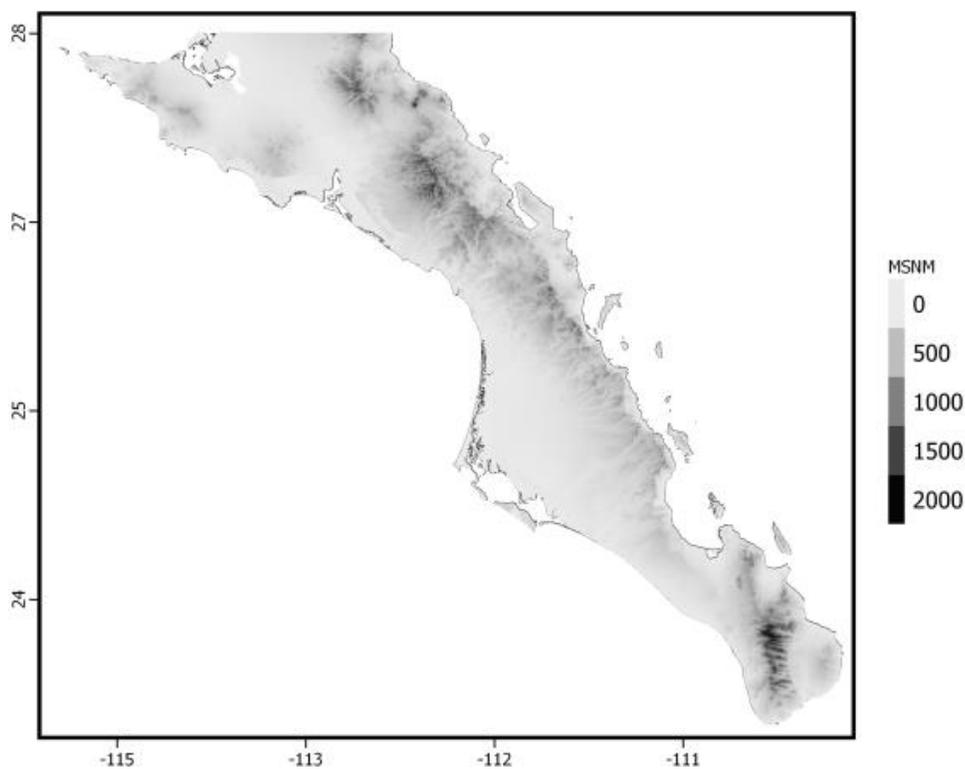


Figura 5. Modelo de Elevación Digital para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).

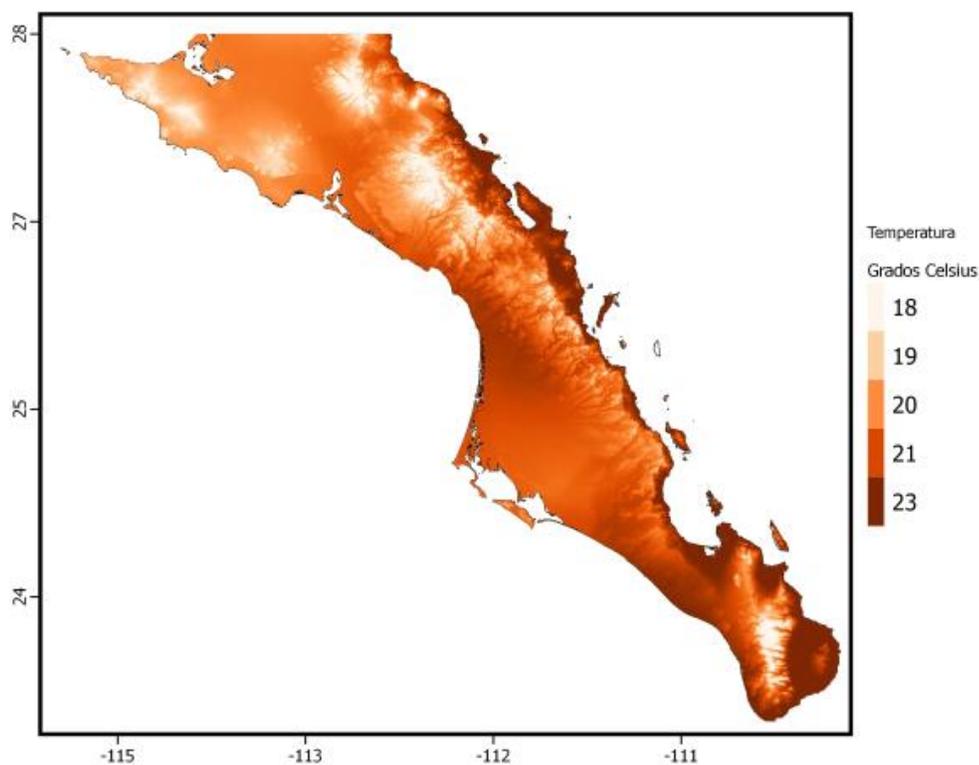


Figura 6. Modelo de la temperatura promedio para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).

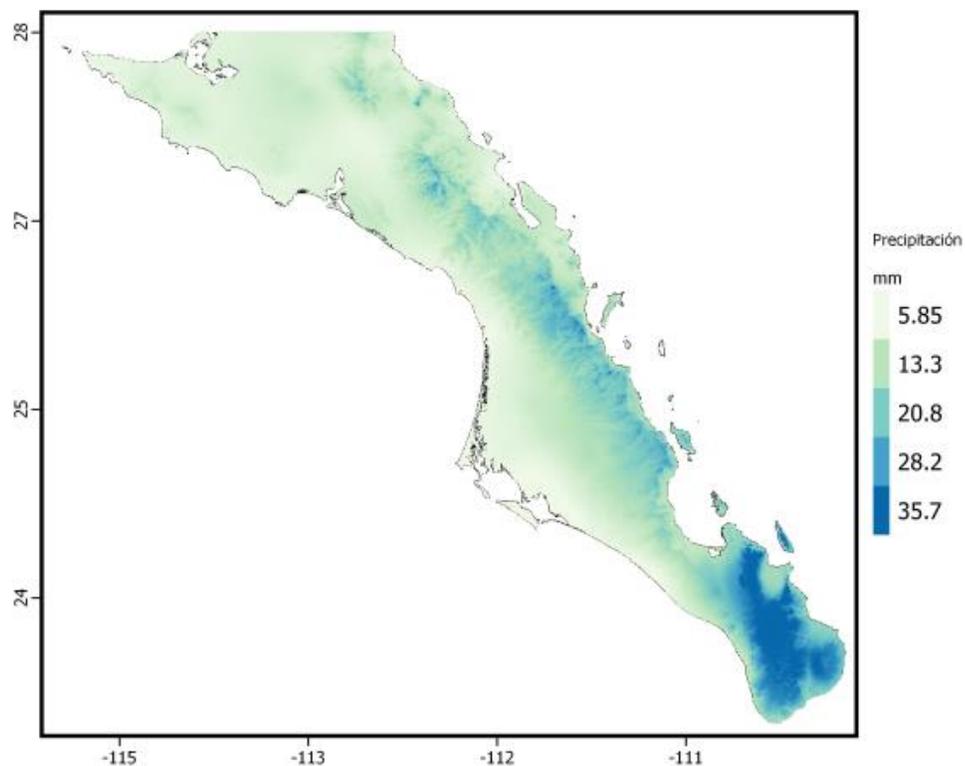


Figura 7. Modelo de la precipitación promedio para Baja California Sur. Fuente de los datos: WorldClim (elaboración propia).

La Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, ubicada al extremo norte del estado, presentó valores del NDVI entre 0.06 y 0.55. Los valores más altos del NDVI en esta reserva de la biósfera se localizan en la Sierra de San Francisco y el volcán Las Tres Vírgenes, con máximos del NDVI de hasta 0.56. Otros sitios con valores relativamente altos del NDVI dentro de la reserva son la Sierra de San José de Castro y la Sierra de Santa Clara, donde podemos encontrar valores máximos de NDVI de hasta 0.25 (Fig. 8).

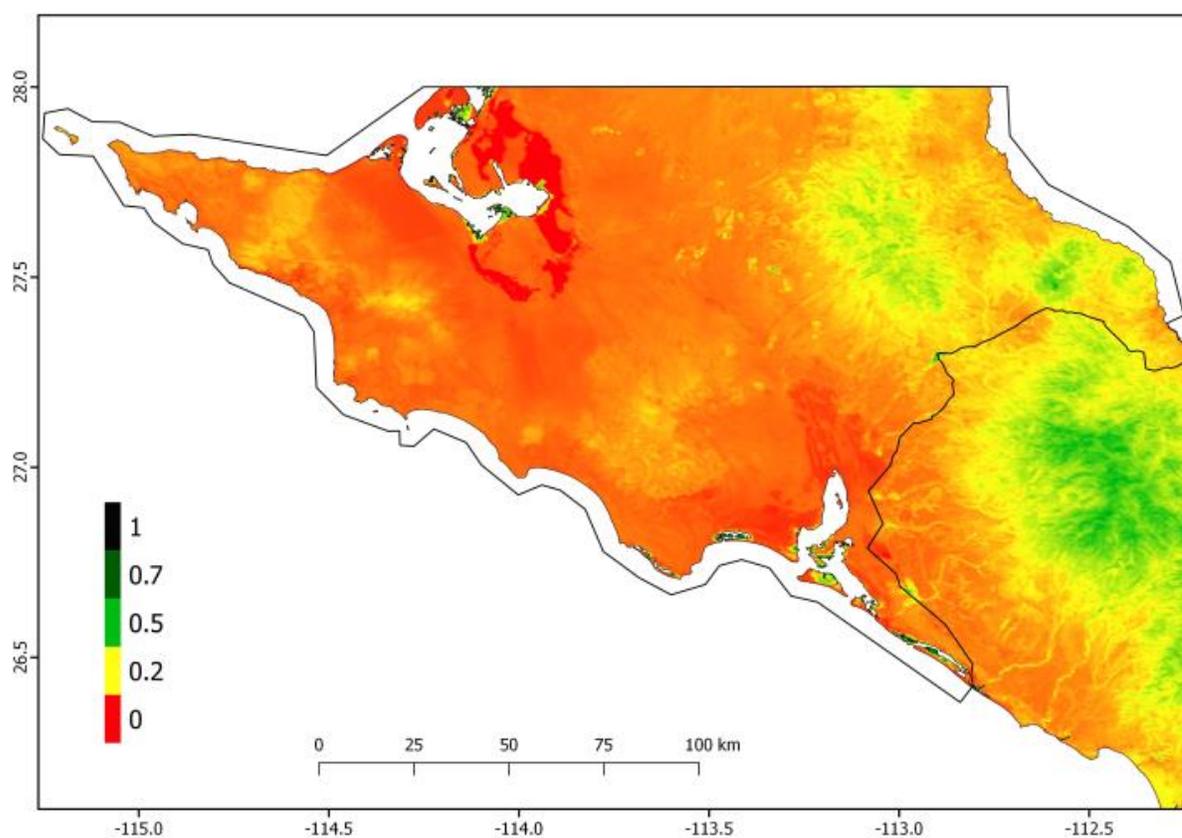


Figura 8. Distribución espacial del promedio de NDVI en La Reserva de la Biosfera el Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, ubicada al sur del estado, se caracteriza por contener, en las regiones de mayor altitud, ambiente templado y es la región en la que más llueve en la entidad (hasta 700 mm en las partes altas) y por ser la única región del estado en donde se pueden encontrar selva baja caducifolia, bosques de encino, bosque de pino-encino y bosques de pino. Razón por la cual, en la reserva encontramos valores mínimos de 0.2 y máximos de 0.7 de NDVI (Fig. 9).

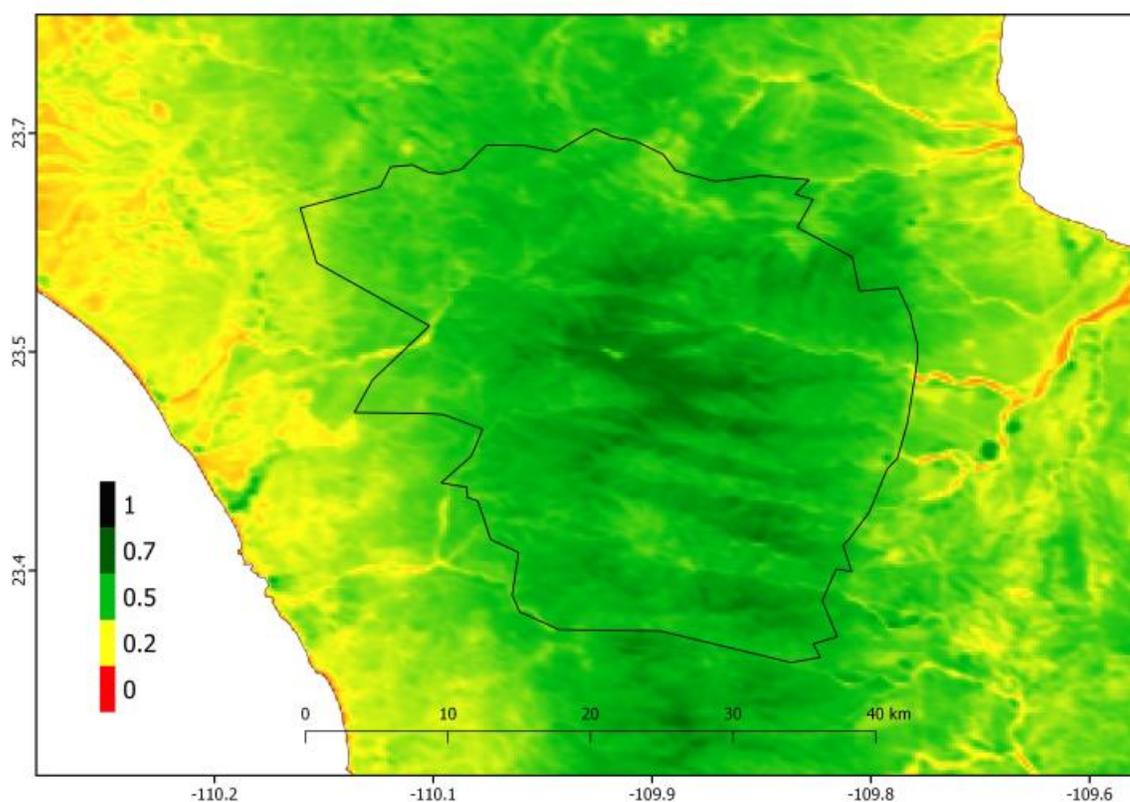


Figura 9. Distribución espacial del promedio de NDVI en La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

7.2 Estacionalidad del NDVI

Como se muestra en la figura 10, se encontró que el periodo de estiaje o de menor vigor en la vegetación de Baja California Sur, es en el lapso de abril a junio, seguido de esto, con las primeras lluvias de julio y agosto se da inicio la temporada de crecimiento vegetación, teniendo su pico más alto en septiembre, en donde de una manera paulatina, inicia un lento decremento en la vigorosidad de la vegetación, hasta llegar al mes de abril, mes en el que termina la temporada de crecimiento de la vegetación y comienza la temporada de estiaje (Fig. 11). La vegetación de Baja California sur, presenta una marcada estacionalidad, que está estrechamente relacionada con las lluvias en la región, ya que al ser de clima semidesértico, la vegetación de la región depende de las lluvias estacionales (Fig. 12).

Para la reserva de la biosfera El Vizcaíno, como se muestra en la figura 13, el periodo de menor vigor en la vegetación es el de mayo a julio, en el mes de agosto, inicia la temporada de crecimiento de la vegetación, teniendo su pico más alto en septiembre, en donde comienza a disminuir la vigorosidad de la vegetación, hasta llegar al mes de mayo, mes en el que termina la temporada de crecimiento y se da inicio a la temporada de estiaje. Cabe señalar, que la punta de Bahía Tortugas presenta un incremento en los valores de NDVI en el periodo de diciembre a febrero, lo anterior debido a las lluvias invernales de la región.

Para la reserva de la biosfera Sierra La Laguna, como se muestra en la figura 14, el periodo de menor vigor de la vegetación es el de abril a junio, en donde con las primeras lluvias de verano, inicia la temporada de crecimiento de la vegetación, en agosto se da un rápido incremento en el verdor de la vegetación, alcanzando su pico más alto en septiembre, en donde comienza un lento decremento en los valores de NDVI, hasta llegar al mes de abril, mes en el que termina la temporada de crecimiento de la vegetación y comienza la temporada de estiaje.

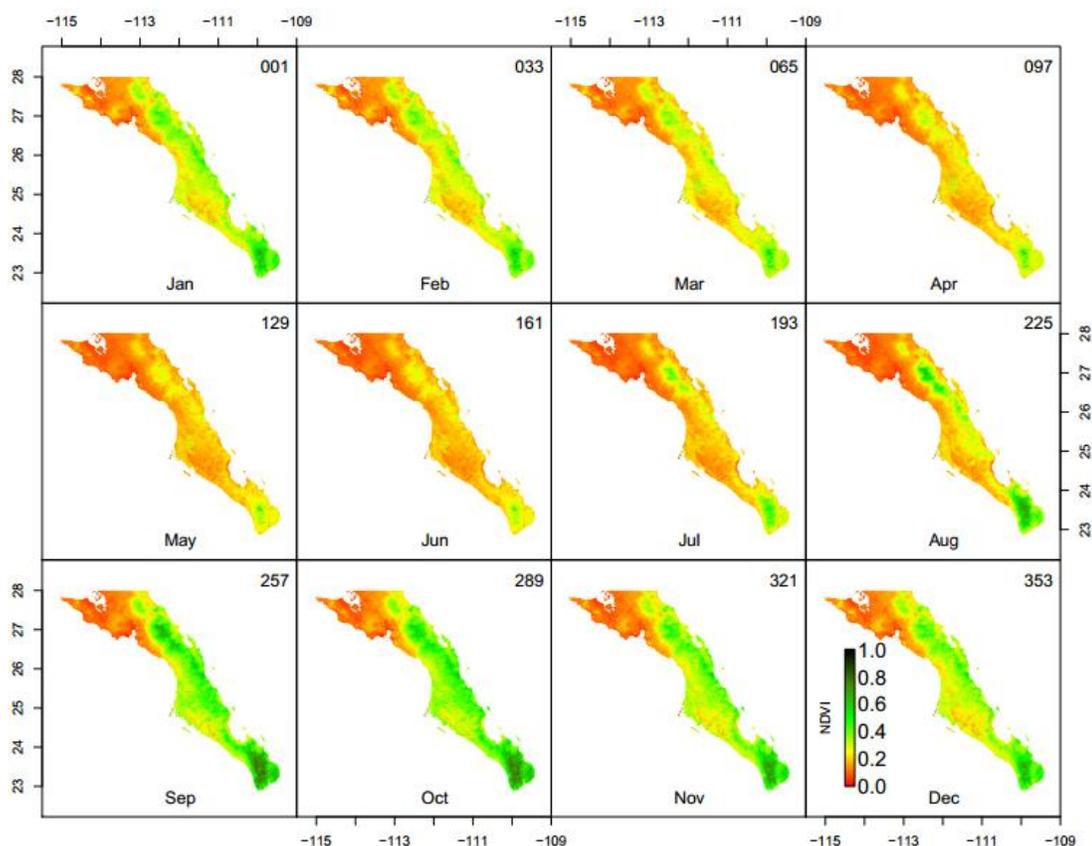


Figura 10. Estacionalidad del NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

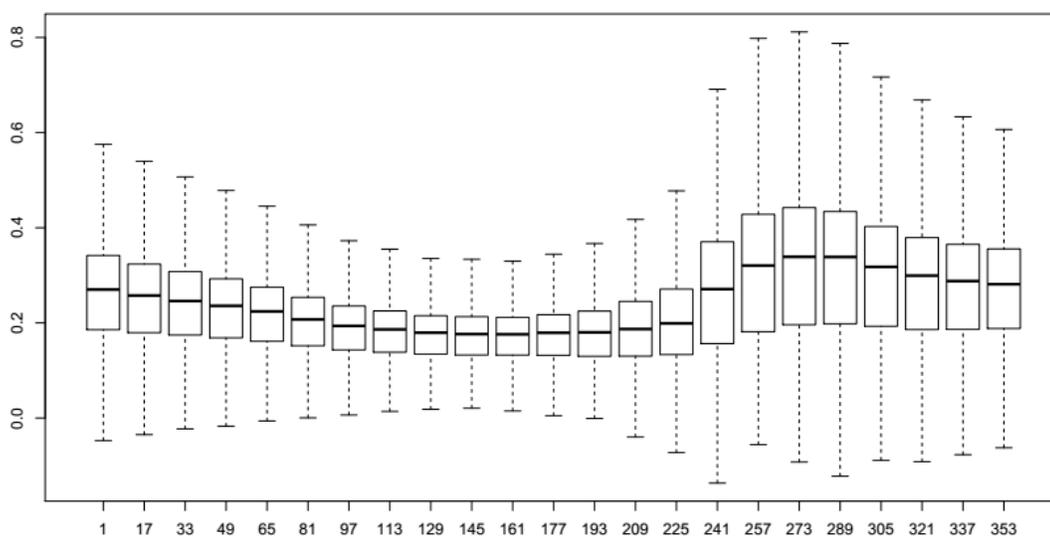


Figura 11. Gráfica de caja, donde se muestra la información contenida en cada una de las imágenes de estacionalidad. La numeración es en días julianos, ya que la información se encuentra disponible de esta manera (elaboración propia).

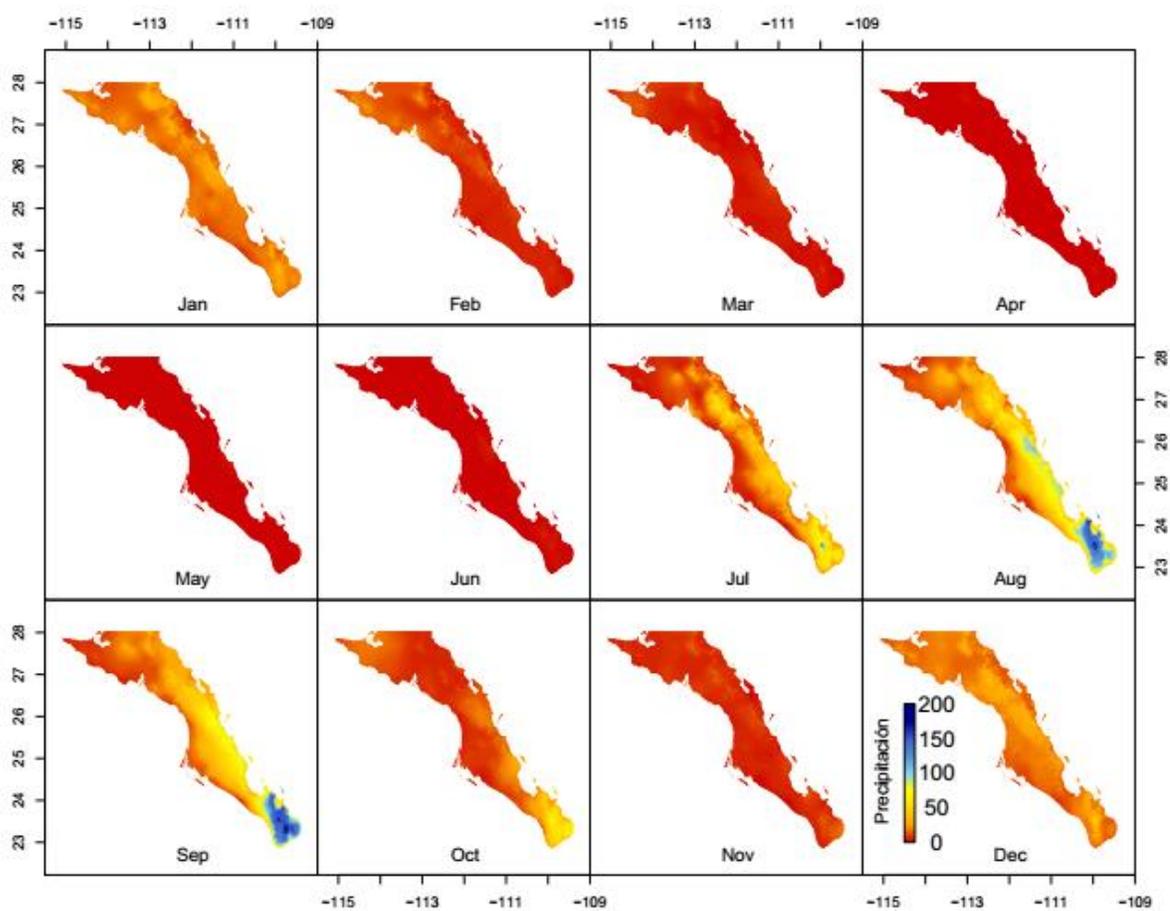


Figura 12. Modelo de precipitación anual para el Estado de Baja California Sur. Fuente de la información: WorldClim (elaboración propia).

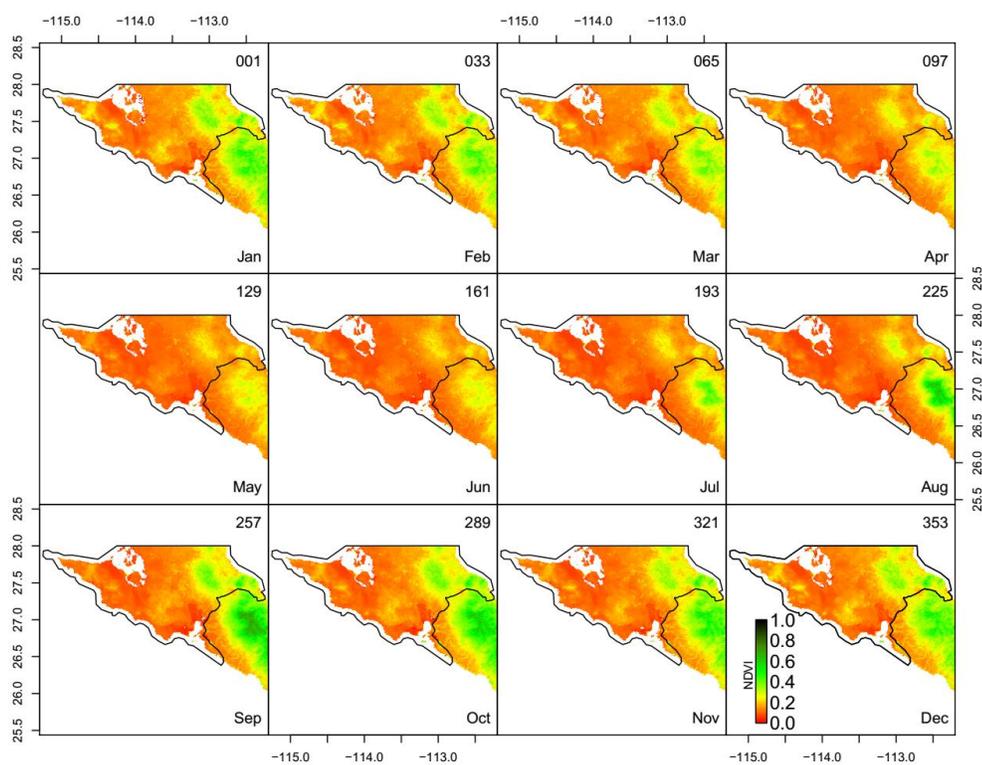


Figura 13. Estacionalidad del NDVI en la reserva de la biosfera El Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

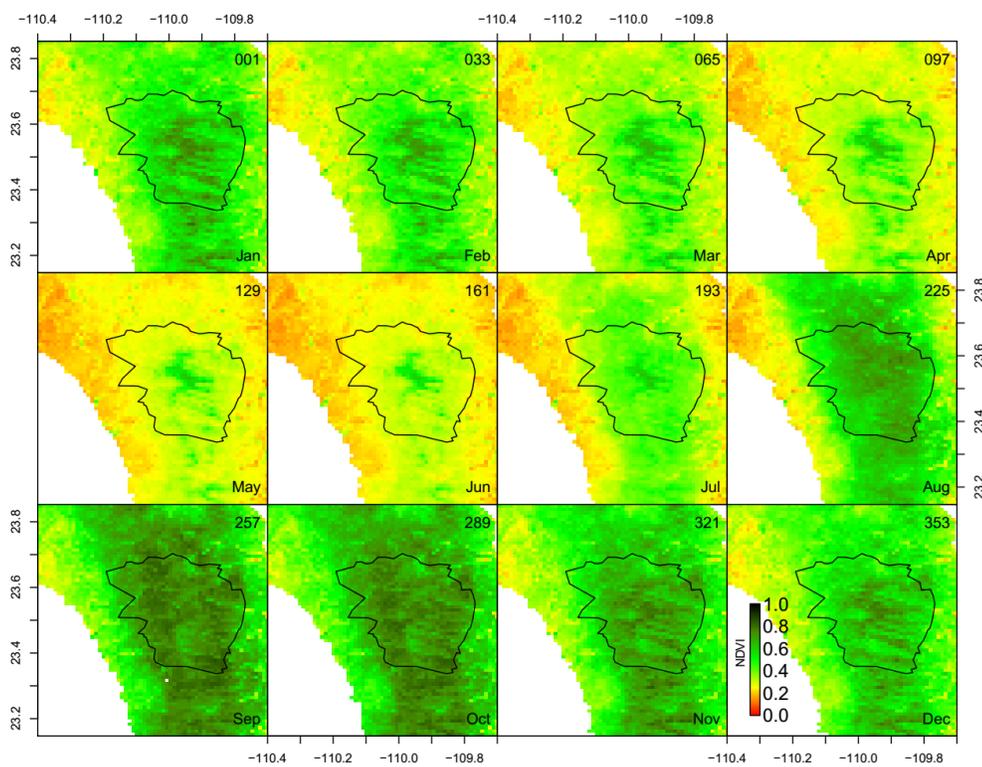


Figura 14. Estacionalidad del NDVI en la reserva de la biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

7.3 Anomalías del NDVI

Una anomalía, es la diferencia que existe entre el valor promedio de NDVI para un año en particular y el valor promedio de NDVI de un específico número de años. En la figura 15 se muestran las anomalías anuales para el periodo comprendido del 2001 al 2016. Las áreas verdes representan anomalías positivas, las amarillas anomalías neutras y las rojas representan anomalías negativas. Los años 2001, 2002, 2010 y 2011, son los que presentan mayores afectaciones negativas, los años 2014 y 2015 son los que presentan mayores afectaciones positivas (Fig. 16), ambas afectaciones (negativas y positivas) se corresponden (respectivamente) con años “Niña” y “Niño” intensos, con relación a datos de series de tiempo del “MEI” o Índice Multivariado de El Niño (Fig. 17). Se realizó un estudio de correlación de Pearson entre los valores de anomalías y el MEI, obteniendo como resultado 0.42.

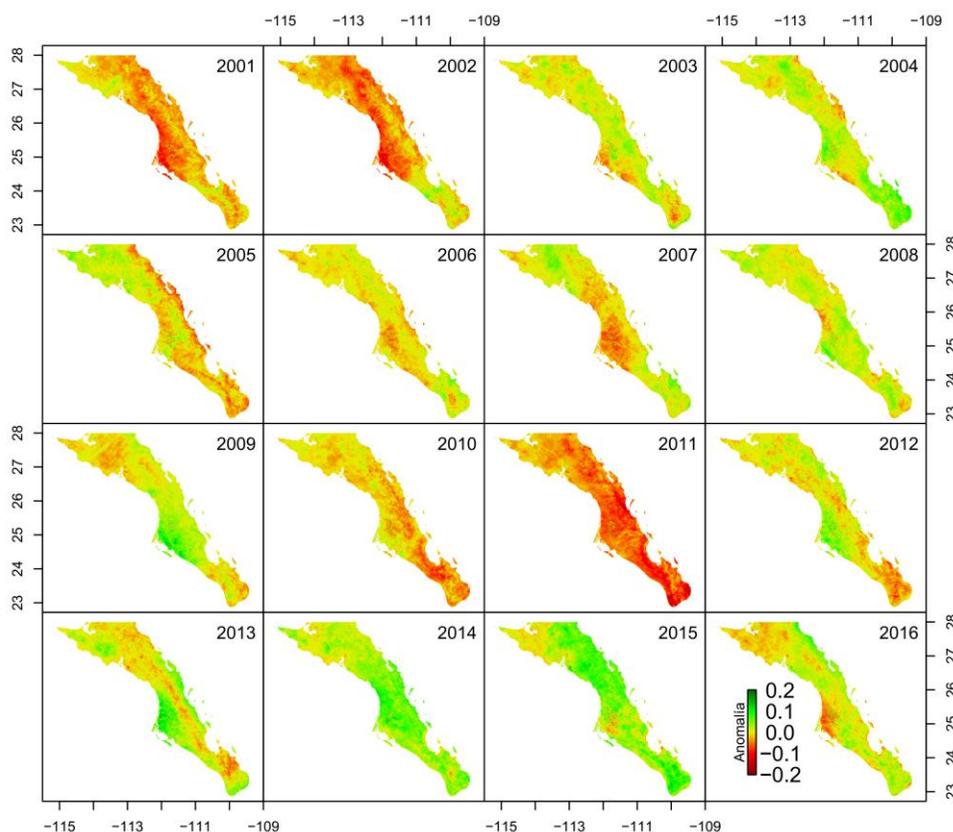


Figura 15. Anomalías anuales de NDVI en el Estado de Baja California Sur, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

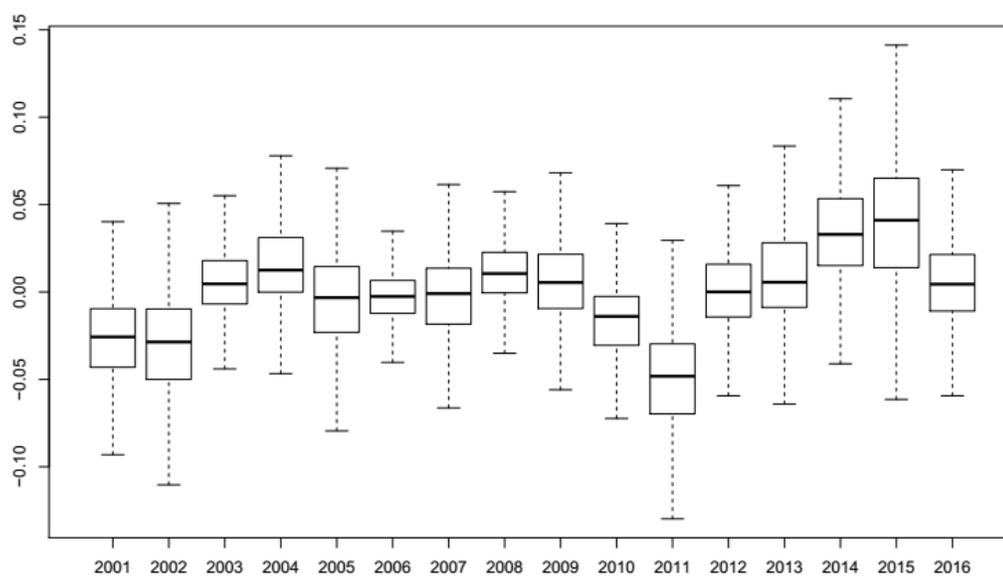


Figura 16. Grafica de caja, donde se muestra la información contenida en cada una de las imágenes de anomalías anuales (elaboración propia).

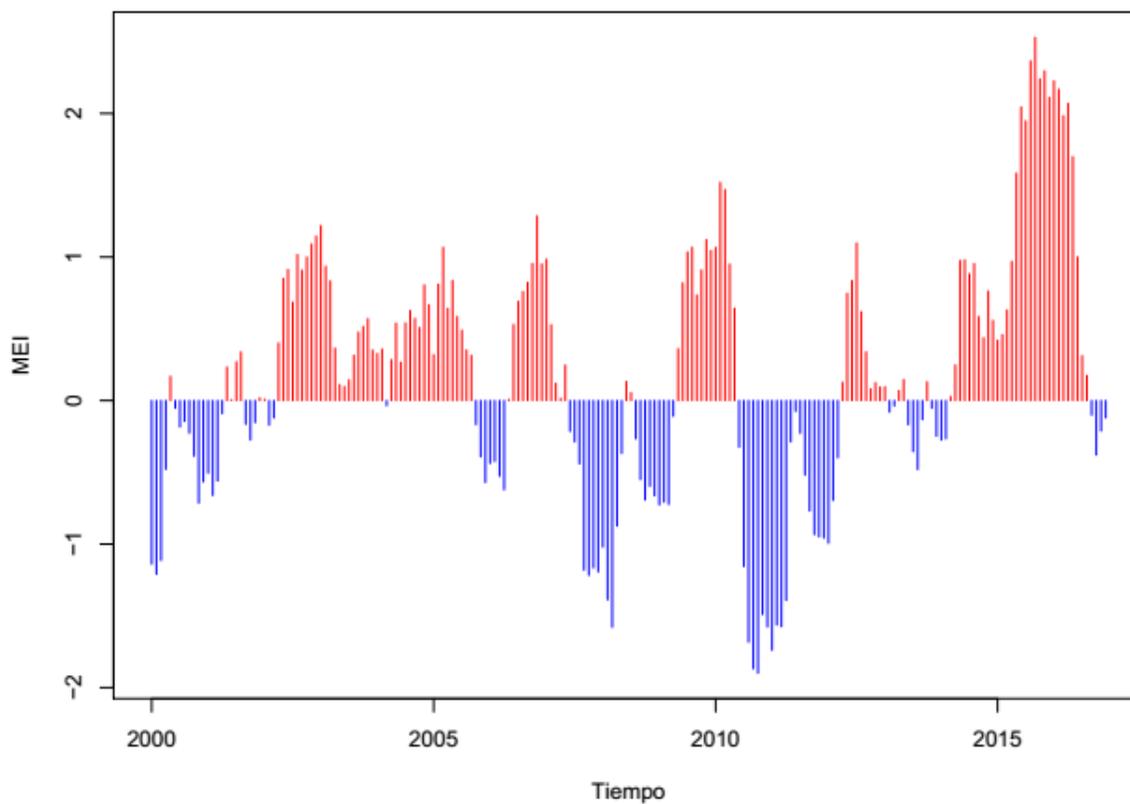


Figura 17. Datos de series de tiempo de MEI (Índice Multivariado del ENSO), por sus siglas en inglés) en el periodo comprendido del año 2000 al 2016 (elaboración propia).

7.4 Tendencia del NDVI

La tendencia del NDVI para Baja California Sur, muestra en un sentido general, una orientación neutra. La tendencia del NDVI se muestra en la figura 18, los valores negativos denotan que la vegetación está perdiendo vigor o que el NDVI está disminuyendo, los valores positivos denotan que la vegetación presenta mayor vigor o que está reverdeciendo, y los valores cercanos a cero denotan cambios poco significativos.

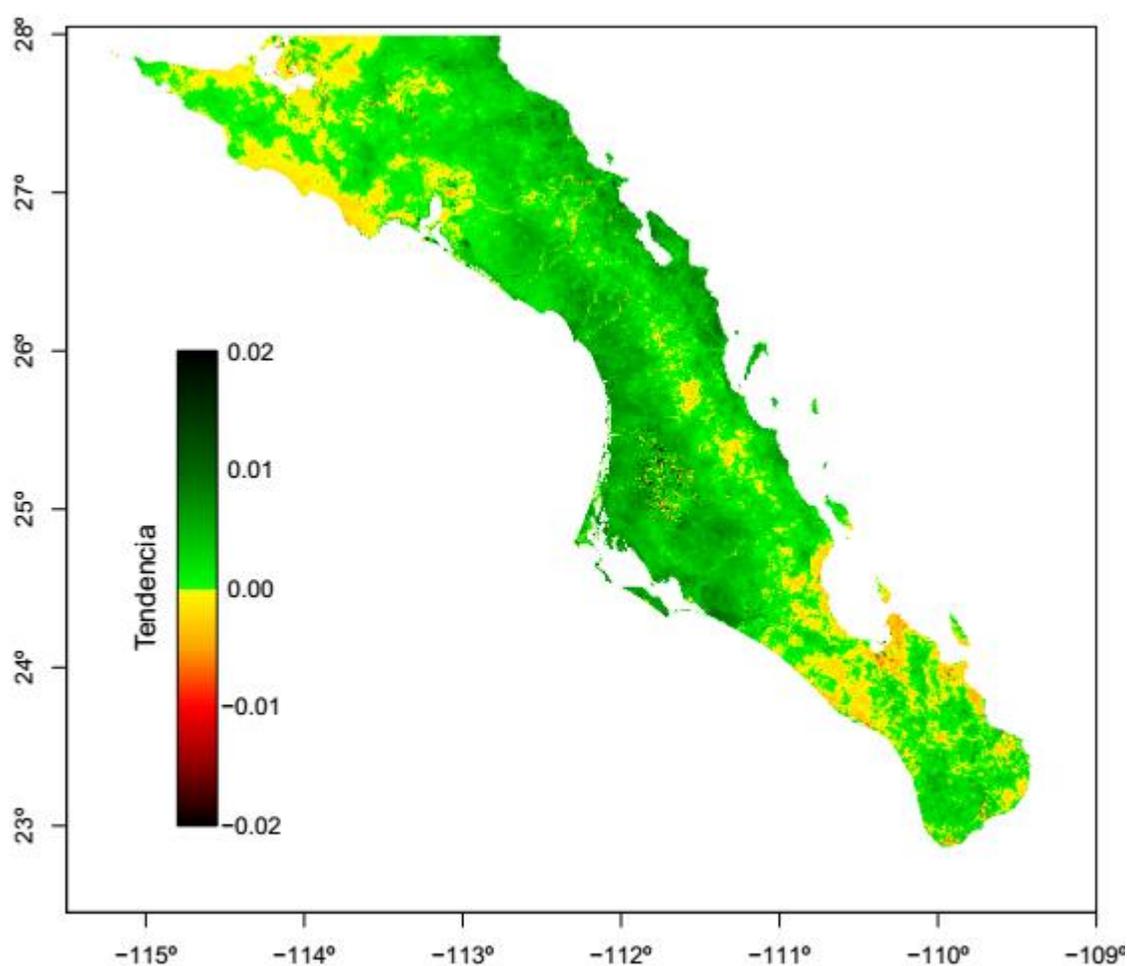


Figura 18. Valores de tendencia del NDVI para el periodo 2001-2016 en Baja California Sur (elaboración propia).

La figura 19 muestra la frecuencia (por píxel) con la que se presentaron los valores de tendencia, el 80% de los valores de tendencia se concentran entre -0.005 y 0.005, lo que indica que la mayoría del área analizada presenta pocos cambios, es decir, que está en condiciones normales, el 18% de los píxeles presentan una tendencia positiva, lo que indica una ganancia de vegetación importante, por último, el 2% de los píxeles analizados presenta tendencia negativa, la mayoría de ellos asociados a las ciudades de La Paz, San José del Cabo y Cabo San Lucas, las zonas de cultivo de Ciudad Constitución y San Juan de los Planes, sin embargo, cabe señalar que existen algunos píxeles con tendencia negativa en la parte alta de la Sierra La Laguna y Punta Balandra.

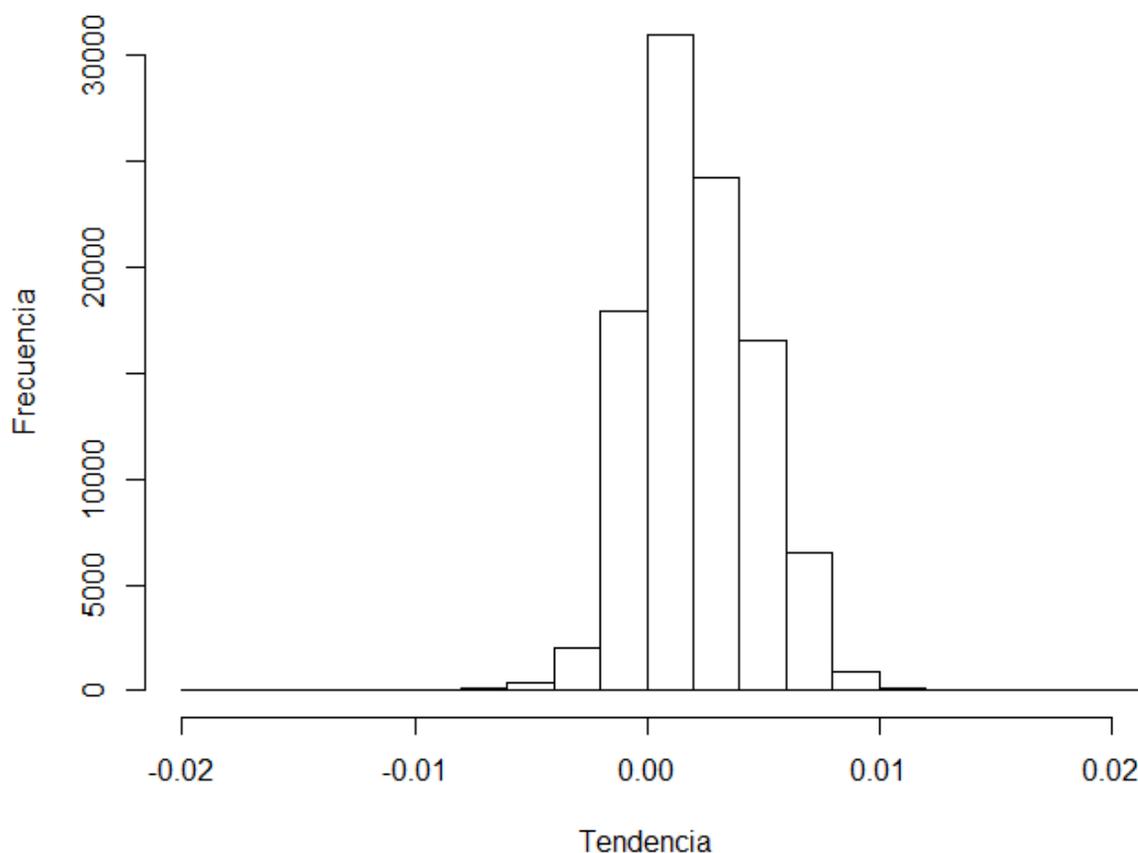


Figura 19. Histograma de frecuencias de los valores de tendencia del NDVI observados en Baja California Sur (elaboración propia).

La Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, ubicada en la porción menos poblada de la entidad, destaca gracias a que prácticamente todos los píxeles en el área presentan valores neutros o positivos, sin embargo, como se muestra en la figura 20 existen valores negativos asociados a la población de Guerrero Negro, la salinera y los pequeños pueblos agrícolas de Emiliano Zapata, Díaz Ordaz y el Caracol.

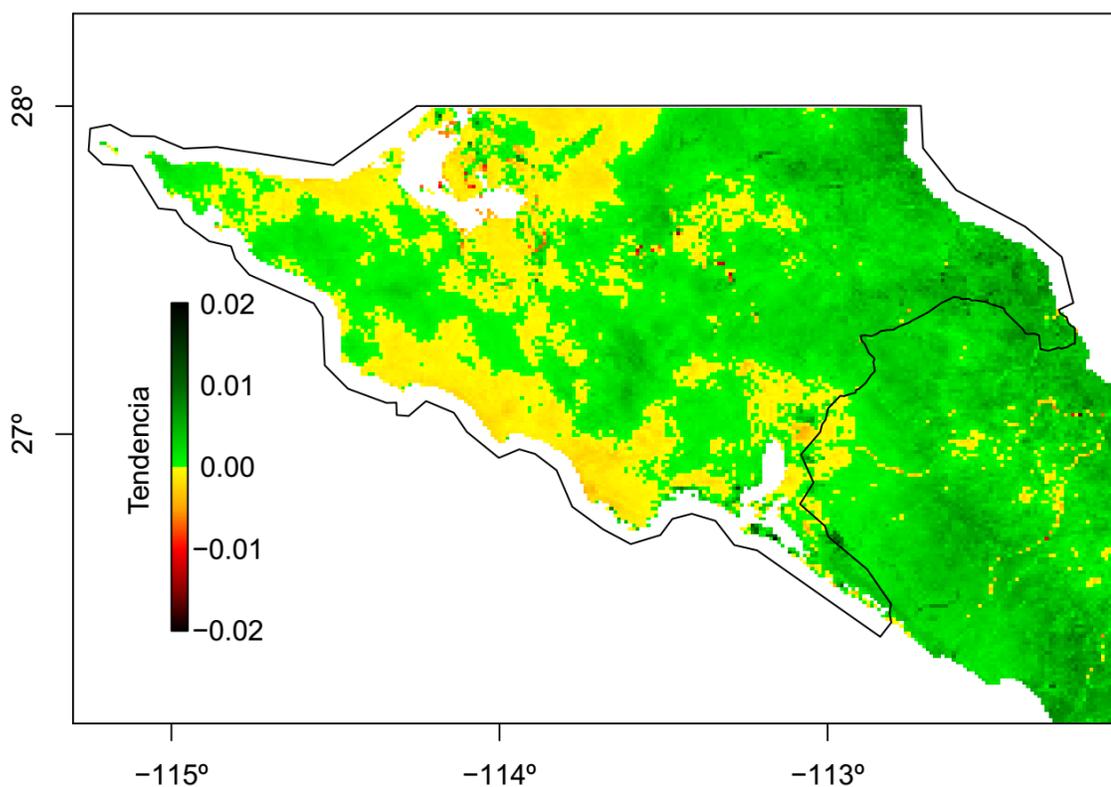


Figura 20. Distribución espacial de la tendencia del NDVI en La Reserva de la Biosfera el Vizcaíno, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

Para la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, ubicada en la porción más poblada de la entidad, la mayoría de los píxeles presentan valores neutros o positivos, sin embargo, existen píxeles con valores negativos dentro de la reserva, en las zonas de mayor altitud y alrededores, lo que indica una pérdida en el vigor de la vegetación de la reserva. Cabe destacar, que en la región, se observa un claro patrón de tendencia negativa, específicamente en las ciudades de La Paz, Todos Santos, San José de los Planes, San José del Cabo y Cabo San Lucas (Fig. 21).

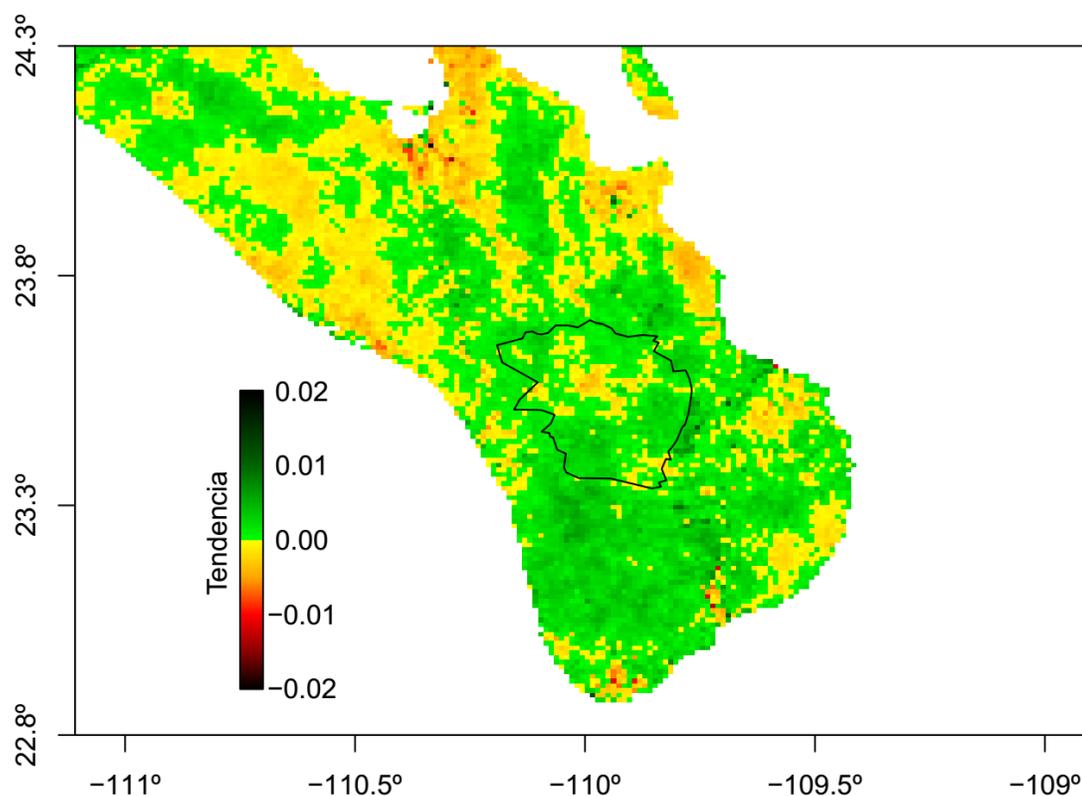


Figura 21. Distribución espacial de la tendencia del NDVI en La Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna, en el periodo del 2001 al 2016 (elaboración propia).

7.5 Efecto del Clima en el NDVI

Para evaluar la influencia que tienen eventos climáticos a gran escala en los patrones de distribución espacio-temporal del NDVI, se realizó un análisis de correlación espacial entre las anomalías de NDVI y datos de series de tiempo de índices climáticos que integran tanto procesos atmosféricos como oceánicos y que están estrechamente relacionados con cambios en la precipitación, como lo son; el índice multivariado del Niño (MEI, por sus siglas en inglés) y el índice oscilación decadal del pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). Valores de MEI o PDO positivos, están asociados con una mayor precipitación y los valores negativos de estos índices tienen el efecto inverso.

Los resultados de la correlación espacial se muestran en la figura 22, los valores en verde corresponden a los píxeles en los que la correlación de Pearson es positiva, es decir, que existe relación, dado que cuando los valores del MEI y el PDO son positivos, las anomalías del NDVI son positivas, o bien, cuando los valores del MEI y el PDO son negativos, las anomalías del NDVI son negativas. Los valores salmón y rojo corresponden a los píxeles en los que la correlación de Pearson es negativa, es decir, la relación es inversa, cuando los valores del MEI y el PDO son positivos, las anomalías del NDVI son negativas, o bien, cuando los valores del MEI y el PDO son negativos, las anomalías del NDVI son positivas. Los valores en color beige corresponden a los píxeles en los que la correlación es neutra, se trata de píxeles en los que no existe influencia positiva ni negativa. Como se puede apreciar, ambos índices tienen influencia prácticamente en toda la entidad, sin embargo, en general es el MEI quien presenta los valores de correlación más altos, exceptuando la punta cercana al poblado Bahía Tortugas, en la que el PDO presenta mayor correlación.

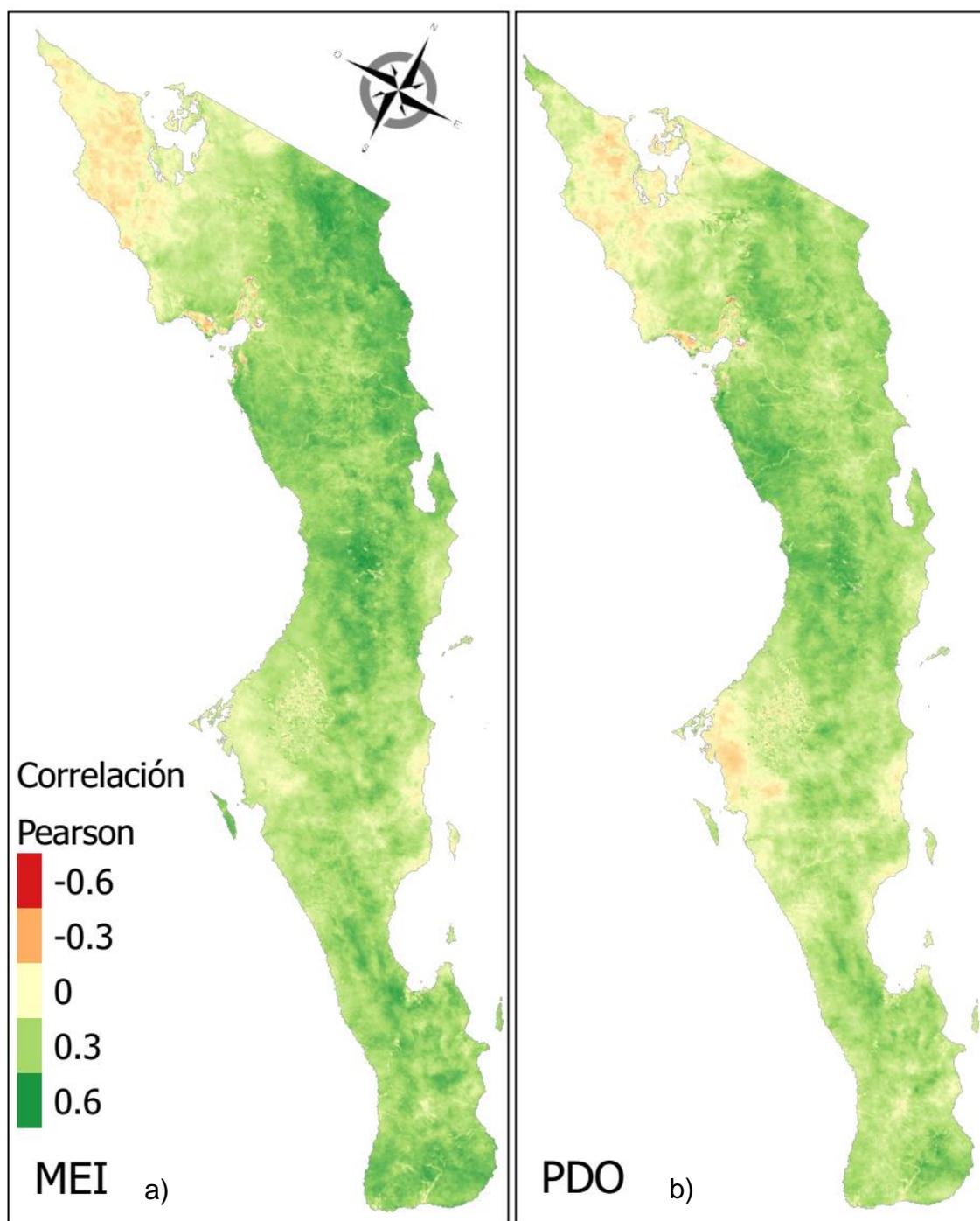


Figura 22. Correlación espacial de Baja California Sur y eventos climáticos de gran escala, a) Correlación de Pearson entre las anomalías mensuales del NDVI y el índice multivariado del niño. b) Correlación de Pearson entre las anomalías mensuales del NDVI y el índice Oscilación Decadal del Pacífico (elaboración propia).

8. DISCUSIÓN

El NDVI es el índice de vegetación más utilizado en las últimas décadas para describir el vigor de la vegetación. Sin embargo, éste índice de vegetación tiene varias limitaciones, siendo la principal que este índice no se puede utilizar como referencia para identificar algún tipo de vegetación en particular, ya que varias especies vegetales o asociaciones florísticas, pueden tener el mismo valor de NDVI, además, este índice tiene una alta variabilidad estacional, relacionada con la fenología de las especies vegetales, por lo tanto, diferentes especies vegetal o asociaciones florísticas pueden tener los mismos valores de NDVI en diferentes estaciones del año. No obstante, éste índice de vegetación es ampliamente utilizado para describir la variación espacio-temporal de la cobertura vegetal en diferentes ecosistemas terrestres, debido a que se cuenta con series de tiempo largas (décadas) y una cobertura global, lo que hace de este índice sea uno de los más adecuados para caracterizar la cobertura vegetal de una región o área en particular y además permite identificar cambios y tendencias en un periodo dado.

En el presente trabajo se utilizó el NDVI como indicador del vigor de la vegetación en Baja California Sur con una resolución espacial de 250 m durante el periodo de 2001 al 2016. Esto permitió describir la cobertura vegetal del estado con un buen nivel de detalle y la identificación de zonas que presentan tendencias positivas o negativas importantes en los últimos 15 años. Existen estudios previos que han descrito la variabilidad de este índice de vegetación en la región (Mercado, 2001; Salinas, 2003), sin embargo, éstos utilizaron imágenes de satélite de menor resolución espacial (1 km), lo que limitó de alguna manera la descripción detallada de los cambios presentes en regiones muy específicas, que en éste trabajo sí son identificadas.

Los valores del NDVI en áreas con presencia de vegetación pueden presentar valores entre 0.1 y 1. Estos valores están relacionados directamente al tipo de

vegetación presente, sin embargo, existen diferentes tipos de vegetación que pueden tener los mismos valores de NDVI, por ejemplo, manglares y selvas bajas (Defries y Townshend, 1994). Es por esto, que una descripción detallada de la variabilidad del NDVI por tipo de vegetación en una región dada es de gran importancia. Los resultados de este trabajo muestran que el 67% de los valores promedio de NDVI en la entidad están representados entre 0.1 y 0.4, lo que ha sido reportado en estudios previos realizados en ecosistemas con climas semiáridos (Weiss *et al.*, 2004). Particularmente, se observó que el tipo de vegetación dominante en el estado (matorrales sarcocaulé, sarco-crasicaule y sarco-crasicaule de neblina) presentó valores promedio de 0.3. Estos valores son similares a los reportados por otros autores en matorrales presentes en otras regiones del mundo (Defries y Townshend, 1994; Zhang *et al.*, 2017). Valores mayores a 0.4 fueron observados en la selva baja caducifolia (al sur del estado), en mezquitales (sierras), manglares y en los bosques de pino, encino y combinaciones de estos (Sierra La Laguna). Estos valores coinciden a lo descrito en estudios anteriores en diferentes regiones de México (Neeti *et al.*, 2012; Salinas *et al.*, 2017), indicando que de manera general estos tipos de vegetación mantienen valores del NDVI más o menos constantes en diferentes latitudes de México.

La heterogeneidad espacial de los valores del NDVI en una región en particular está principalmente influenciada por la topografía de la región y las variables ambientales presentes en las mismas. En este trabajo se observó que la alta heterogeneidad del NDVI está relacionada principalmente a la heterogeneidad topográfica y climática de la región. Sin embargo, algunos autores sugieren que el NDVI no se ve muy afectado por la topografía (Jiang *et al.*, 2015). Estos resultados contrastantes pudieran estar relacionados a que en este trabajo se describió la variabilidad espacial del NDVI en una región poco poblada, donde el 80% del territorio no ha presentado un cambio de uso de suelo muy marcado (Salinas *et al.*, 2017), por el contrario, en la cuenca del Río Amarillo, China, la densidad

poblacional es muy alta y se han registrado importantes cambios de uso de suelo en las últimas décadas (Chen *et al.*, 2016).

La variabilidad estacional de la cobertura vegetal ha sido descrita con métodos tradicionales como Cleland *et al.* (2007) y aproximaciones realizadas con índices de vegetación. Al respecto, Hmimina *et al.* (2013) en siete diferentes áreas de estudio, demostraron que mediante el uso del NDVI se pueden identificar diferentes etapas del crecimiento de la vegetación, por ejemplo, inicio/fin de la temporada de crecimiento, floración y maduración de los frutos. Esto ha permitido comprender la respuesta del ecosistema ante la variabilidad climática a diferentes escalas espaciales. Los ecosistemas áridos y semiáridos proporcionan ambientes únicos para detectar variación climática provocada por cambios en la precipitación, dado que el agua es el mayor recurso limitante en estos ambientes. Al respecto, se ha descrito que poco tiempo después de la temporada de lluvias, la vegetación responde; ya sea germinando, creciendo o reproduciéndose (Ernest *et al.*, 2000; Weiss *et al.*, 2004). En este trabajo se observó que las estaciones de máximo desarrollo vegetal varían dependiendo al tipo de vegetación y la latitud. Particularmente, para los matorrales, selva baja y bosques, se observó que los valores máximos del NDVI se presentan en los meses de septiembre y octubre, justo después de las lluvias de verano, mientras que los matorrales xerófilos presentes en el norte del estado, presentan sus valores máximos de crecimiento vegetal en los meses de febrero y marzo, justo después de las lluvias de invierno, presentes en esta región, lo que concuerda con lo planteado por Salinas *et al.* (2002).

La variación interanual del vigor de la vegetación ha sido relacionada principalmente con eventos de gran escala como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), ya que este evento afecta directamente la precipitación (Magaña *et al.*, 2003). En la fase fría del ENSO, conocida comúnmente como La Niña, la precipitación es menor que en años normales,

mientras que en la fase cálida del ENSO, conocida comúnmente como El Niño, la precipitación es mayor que en años normales (Pavia *et al.*, 2006; Timmermann *et al.*, 2018). En este trabajo se observó que los años 2011-2012 presentaron las anomalías negativas más intensas en el NDVI, estos años corresponden a una intensa fase negativa del ENSO que persistió en el periodo 2010-2012. Por otro lado, el año 2015 fue el que presentó las anomalías positivas más intensas, lo que corresponde con una fase positiva del ENSO (El Niño) que persistió en el periodo 2014-2016. Al respecto, existen diversos trabajos que han relacionado el efecto del ENSO con la variabilidad interanual del NDVI, y encontraron resultados similares (Anyamba y Eastman, 2001; Nagai *et al.*, 2007). Indicando que este evento de gran escala es la principal fuente de variabilidad climática que afecta directamente al vigor de la vegetación.

Al analizar la correlación espacial de las anomalías de NDVI para el periodo 2001-2016 y datos de series de tiempo del MEI y el PDO para el mismo periodo, es posible apreciar la influencia que estos eventos climáticos tienen sobre los procesos naturales que se dan en tierra. Diversos autores han reportado la relación que existe entre los eventos climáticos a gran escala y el incremento del vigor de la vegetación de distintas regiones en el mundo (Brown *et al.*, 2010; Gong y Shi, 2003; Li y Kafatos, 2000; Willem *et al.*, 2013). Como patrón general, la correlación de Pearson presenta valores positivos en toda la península, tanto para el MEI como para el PDO, sugiriendo así que fases positivas o negativas de ambos índices climáticos están linealmente relacionados con anomalías en el NDVI, es decir, un incremento del vigor de la vegetación en fases cálidas de estos índices (usualmente con mayor precipitación) o una disminución en el vigor de la vegetación en las fases frías de estos índices (usualmente con menor precipitación). Sin embargo, en la región localizada al noroeste del estado se presentan valores negativos en la correlación, sugiriendo que en las fases cálidas de estos eventos, las anomalías del NDVI son negativas, lo que implica que en años en los que llueve más de lo normal, la vegetación presente en esta área

disminuye su vigor. Esto podrá deberse a que esta región es la más árida de la entidad y la vegetación presente está adaptada a las lluvias escasas, por lo que un aumento en las lluvias afecta de manera importante a la vegetación ahí presente, sin embargo, en este estudio no se cuentan con elementos adicionales para comprobar esto.

La tendencia lineal del NDVI está relacionada con los cambios en la vegetación a largo plazo y muestra las áreas en las que se está perdiendo o ganando vigor de la vegetación o un cambio en el uso del suelo. En el presente trabajo, la mayor parte del territorio de la entidad se encuentra en buen estado de conservación, dado que 80% se encuentra en condición neutra, 18% en condición positiva y 2% en condición negativa, coincidiendo con lo reportado por Salinas *et al.* (2017). Con base en lo encontrado, se sugiere que el buen estado de conservación se debe a que Baja California Sur es la entidad con menor densidad poblacional (INEGI, 2016), a que las condiciones climáticas no se prestan para realizar agricultura o ganadería de manera extensiva (SAGARPA 2018a, 2018b) y a que en la entidad existen muchas áreas poco accesibles. Sin embargo, es en la porción sur de la entidad donde se concentran la mayoría de los valores con tendencia negativa. En esta región del estado se encuentran las ciudades con mayor densidad poblacional de los municipios de La Paz y Los Cabos, y es la región de mayor crecimiento poblacional y turístico (López, 2002; Picasso *et al.*, 2018). Dichos centros de población rodean la Reserva de la Biosfera Sierra la Laguna, ejerciendo presión a su sistema natural, lo que se refleja en las áreas con valores de tendencia negativa dentro del ANP.

9. CONCLUSIONES

- El uso de índices de vegetación obtenidos mediante percepción remota es una herramienta muy valiosa que permite describir cambios espacio-temporales de la cobertura vegetal a nivel regional con buena resolución espacial en las últimas dos décadas.
- El vigor de la vegetación en BCS tiene una alta variabilidad estacional, observándose valores máximos principalmente en el verano (septiembre), reflejo de las lluvias estacionales.
- La variación espacio-temporal del vigor de la vegetación presente en BCS está estrechamente relacionada con eventos climáticos de gran escala como El Niño Oscilación del Sur. En la fase cálida de este fenómeno se incrementa el vigor de la vegetación, por el contrario, en la fase fría se disminuye el vigor de la vegetación.
- La cobertura vegetal en BCS se ha mantenido estable en los últimos 16 años debido a la baja densidad poblacional, sin embargo, la parte sur del estado presenta niveles de degradación de la cobertura vegetal a consecuencia del crecimiento poblacional de los municipios de La Paz y Los Cabos. Por el contrario, la mayor parte del estado presenta un ligero incremento en el vigor de la vegetación, a consecuencia de un incremento aparente de lluvias, inferido por periodos prolongados de eventos El Niño, principalmente en los últimos 3 años del periodo de estudio.

9.1. Recomendaciones

Con base en lo encontrado en el presente estudio respecto a la tendencia del NDVI, se sugiere se revisen las afectaciones encontradas dentro del ANP “Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna”, dado que existen algunos píxeles con tendencia negativa, denotando alguna alteración.

Dentro de un proyecto con fines de protección ambiental, siempre se desea que haya una mejora continua del mismo, por lo que se recomienda a futuros estudiantes que tengan interés en el proyecto, la complementación *temporal* de la información en los años venideros. Y aún más, se sugiere continuar el monitoreo de los cambios de la vegetación, específicamente en los municipios de La Paz y Los Cabos. Lo anterior, derivado de lo observado cerca de los mayores centros de población de mencionados municipios.

10. LITERATURA CITADA

Anyamba, A., C. J. Tucker. 2001. NDVI anomaly patterns over Africa during the 1997/98 ENSO warm event. *Int. J. Remote Sens.* 22:1847–1859.

Bannari, A., D. Morin, F. Bonn, A. R. Huete. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sens. Rev.* 13:95–120.

BCS. 2015. Baja California Sur. Gobierno del Estado, Información Estratégica (Vol. 1). Baja California Sur. Disponible en:
<http://spyde.bcs.gob.mx/files/die/2015/EstrategicoBCSJulio2015.pdf>

Brown, M. E., K. de Beurs, A. Vrieling. 2010. The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. *Remote Sens. Environ.* 114:2286–2296.

Chen, J., Shi, H., Sun, L., Niu, J., F. Gassert. 2016. Yellow River Basin. en V. Singh (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (2nd ed., pp. 1–24). China: McGraw-Hill.

Cleland, E. E., I. Chuine, A. Menzel, H. A. Mooney, M. D. Schwartz. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22:357–365.
CONANP 2017

de Jong, R., S. de Bruin, A. de Wit, M. E. Schaepman, D. L. Dent. 2011. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sens. Environ.* 115:692–702.

Defries, R. S., J. R. Townshend. 1994. Ndvi-Derived Land Cover Classifications At a Global Scale. *Int. J. Remote Sens.* 15:3567–3586.

Erasmi, S., P. Propastin, M. Kappas, O. Panferov. 2009. Spatial patterns of NDVI variation over Indonesia and their relationship to ENSO warm events during the period 1982-2006. *J. Clim.* 22: 6612–6623.

Ernest, S. K. M., J. H. Brown, R. R. Parmenter, S. K. M. Ernest, J. H. Brown, R. R. Parmenter, R. R. Rodents. 2000. Rodents, Plants , and Precipitation : Spatial and Temporal Dynamics of Consumers and Resources. *Nord. Soc. Oikos.* 88:470–482.

Gong, D. Y., P. J. Shi. 2003. Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring. *Int. J. Remote Sens.*, 24:2559–2566.

Hijmans R. J. 2016. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.5-8.

Greenberg J. A., M. Mattiuzzi. 2018. gdalUtils: Wrappers for the Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) Utilities. URL <https://CRAN.R-project.org/package=gdalUtils>

Hmimina, G., E. Dufrêne, J. Y. Pontailier, N. Delpierre, M. Aubinet, B. Caquet, K. Soudani. 2013. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sens. Environ.* 132:145–158.

Huete, A. R., R. D. Jackson, D. F. Post. 1985. Spectral Response of a Plant Canopy with Different Soil Backgrounds. *Remote Sens. Environ.* 53:37–53.

INEGI. 2015. 'División política estatal 1:250000. 2015, escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.. Obtenido de Cartografía geoestadística urbana y rural amanzanada. Cierre de la Encuesta Intercensal 2015. Aguascalientes, México

INEGI. 2016. 'Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union)', escala: 1:250 000. edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México

Jiang, W., L. Yuan, W. Wang, R. Cao, Y. Zhang, W. Shen. 2015. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecol. Indic.* 51:117–126.

Kerr, J. T., M. Ostrovsky. 2003. From space to species: Ecological applications for remote sensing. *Trends Ecol. Evol.*, 18:299–305.

Lee, H. S., T. Yamashita, T. Mishima. 2012. Multi-decadal variations of ENSO, the Pacific Decadal Oscillation and tropical cyclones in the western North Pacific. *Prog. Oceanogr.* 105:67–80.

León de la Luz, J. L., R. Domínguez-Cadena. 2010. Analysis of forest types and estimates of biomass in the Sierra de La Laguna Reserve, Baja California Sur, Mexico. *Can. J. For. Res.* 40:2059–2068.

Li, Z., M. Kafatos. 2000. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Remote Sens. Environ.*, 71:239–247.

López López, Á. 2002. Análisis de los flujos turísticos en el corredor Los Cabos, Baja California Sur. *Investig. Geográficas.* 47:131–149.

Magaña, V. O., J. L. Vázquez, J. L. Pérez, J. B. Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofis. Int.* 42:313–330.

- Mercado, C. 2001. Análisis del índice de Vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) para la península de Baja California México (1981-2000) y su relación con el ENSO. Tesis (Maestría en Ciencias). Baja California Sur, México. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. 52 p.
- Nagai, S., K. Ichii, H. Morimoto. 2007. Interannual variations in vegetation activities and climate variability caused by ENSO in tropical rainforests. *Int. J. Remote Sens.*, 28:1285–1297.
- Neeti, N., J. Rogan, Z. Christman, J. R. Eastman, M. Millones, L. Schneider, B. Ghimire. 2012. Mapping seasonal trends in vegetation using AVHRR-NDVI time series in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Remote Sens. Lett.*, 3:433–442.
- Pavia, E. G., G. Federico, J. Reyes. 2006. PDO – ENSO Effects in the Climate of Mexico. *J. Clim.* 19:6433–6438.
- Peng, S., S. Piao, P. Ciais, R. B. Myneni, A. Chen, F. Chevallier, H. Zeng. 2013. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 501:88–92.
- Picasso Salazar, E., F. I. Ruiz Ceseña, A. F. Torres García. 2018. Análisis de oportunidades para el desarrollo de actividades de turismo alternativo en la región norte de Baja California Sur (México). *3c Empresa*, 7:32–48.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Riemann, H., E. Exequiel. 2007. Endemic regions of the vascular flora of the peninsula of Baja California, Mexico. *J. Veg. Sci.* 18:327–336.
- Riemann, H., E. Ezcurra. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the peninsula of Baja California, Mexico. *Biol. Conserv.* 122:141–150.
- Rosete Vergés, F. A., J. L. Pérez Damián, G. Bocco. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investig. Geográficas Bol. del Inst. Geogr. UNAM.* 67:39–58.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite–1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.

SAGARPA. 2018a. <https://www.gob.mx/sagarpa/bajacaliforniasur/articulos/la-actividad-agricola-en-baja-california-sur?idiom=es>.

SAGARPA. 2018b. <https://www.gob.mx/sagarpa%7Cbajacaliforniasur/articulos/produccion-ganadera-en-baja-california-sur>.

Salinas-Zavala, C. A., A. V. Douglas, H. F. Diaz. 2002. Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sens. Environ.*, 82:417–430.

Salinas-Zavala, C. A. 2003. Respuesta biótica terrestre a la variabilidad climática en el noroeste de México. Tesis (Doctorado en Ciencias) Baja California, México. Centro de Investigación Científica y de educación superior de Ensenada. 142 p.

Salinas-Zavala, C. A., R. O. Martínez-Rincón, M. V. Morales-Zárate. 2017. Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. *Investig. geográficas*, 94:82–90.

Schmidt, K. S., A. K. Skidmore 2003. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sens. Environ.*, 85:92–108.

Timmermann, A., A. Soon II, J. S. Kug, F. F. Jin, W. Cai, A. Capotondi, K. Cobb, M. Lengaigne, M. J. McPhaden, M. F. Stuecker, K. Stein, A. T. Wittenberg, K. S. Yun, T. Bayr, H. C. Chen, Y. Chikamoto, B. Dewitte, D. Dommengot, P. Grothe, E. Guilyardi, Y. G. Ham, M. Hayashi, S. Ineson, D. Kang, S. Kim, W. M. Kim, J. Y. Lee, T. Li, J. J. Luo, S. McGregor, Y. Planton, S. Power, H. Rashid, H. L. Ren, A. Santoso, K. Takahashi, A. Todd, G. Wang, G. Wang, R. Xie, W. H. Yang, S. W. Yeh, J. Yoon, E. Zeller, X. Zhang. 2018. El Niño–Southern Oscillation complexity. *Nature*, 559:535–545.

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127–150.

Wang, C., P. C. Fiedler. 2006. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69:239–266.

Wang, F., X. Wang, Y. Zhao, Z. Yang. 2014. Temporal variations of NDVI and correlations between NDVI and hydro-climatological variables at Lake Baiyangdian, China. *Int. J. Biometeorol.* 58:1531–1543.

Weiss, J. L., D. S. Gutzler, J. E. A. Coonrod, C. N. Dahm. 2004. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *J. Arid Environ.* 58:249–272.

Willem, J. D. V. L., K. Hartfield, M. Miranda, F. J. Meza. 2013. Trends and ENSO/AO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sens.*, 5:1177–1203.

Xue, J., B. Su, 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J. Sensors*. 2017:1–17.

Yengoh, G. T., D. Dent, L. Olsson, A. E. Tengberg, C. J. Tucker III. 2015. Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: current status, future trends, and practical considerations. Primera edición, Editorial Springer. Pp 9-11.

Zhang, X., S. Wu, X. Yan, Z. Chen. 2017. A global classification of vegetation based on NDVI, rainfall and temperature. *International Journal of Climatology*, 37:2318–2324.