



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ

POSTGRADO DE INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES

CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES EN EL ALTIPLANO OESTE DE SAN LUIS POTOSÍ UTILIZANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

JOSE CAMILO CÁMARA USCANGA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

2023



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

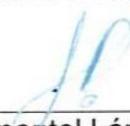
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: ***“Clasificación de coberturas vegetales en el altiplano oeste de San Luis Potosí utilizando técnicas de teledetección”*** realizada por el estudiante: **“José Camilo Cámara Uscanga”** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



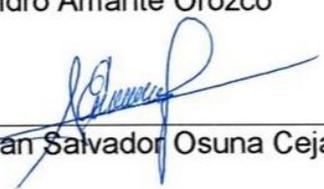
Dr. José Pimentel López

ASESOR



Dr. Alejandro Amante Orozco

ASESOR



Dr. Esteban Salvador Osuna Ceja

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, enero de 2023.

CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES EN EL ALTIPLANO OESTE DE SAN LUIS POTOSÍ UTILIZANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

José Camilo Cámara Uscanga, MC
Colegio de Postgraduados, 2023

RESUMEN

La cobertura terrestre caracterizada en forma importante por la fisonomía de la vegetación es una expresión de la influencia de diversos factores. La Teledetección se ha convertido en la actualidad como una de las principales herramientas para su monitoreo y análisis. Se llevó a cabo una revisión de la estructura intelectual de la aplicación de la Teledetección en los estudios de la vegetación por medio del análisis de la producción científica mediante el uso de técnicas bibliométricas y se analizó la variabilidad espacio-temporal del NDVI promedio anual en las coberturas vegetales del Altiplano Potosino a través de una serie temporal de imágenes Landsat. Utilizando la base de datos Web of Science (WoS) de publicaciones científicas de 1980 a 2020 y el programa VOSviewer se identificó que el número de publicaciones científicas relacionadas al uso de la Teledetección para el estudio de la vegetación ha aumentado gradualmente principalmente en los últimos años diversificándose en sus temáticas de investigación como el uso de series tiempo. Para analizar la serie temporal (1993-2021) del NDVI de la zona de estudio se utilizó el coeficiente de variación y el análisis de tendencia de la prueba de Mann-Kendall. La distribución espacial del NDVI fluctuó entre -0.17 a 0.57, donde los valores más altos se presentaron en las zonas agrícolas y los valores intermedios en los matorrales. Las variaciones temporales del NDVI fluctuaron de 0.18 a 0.22, con los valores más altos en 2015, mientras que los más bajos se observaron en 2017. Los métodos de análisis de series de tiempo de imágenes de satélites a través de técnicas de Teledetección sugieren que las coberturas vegetales del área presentan una tendencia al cambio de uso derivado de las actividades humanas.

Palabras clave: Bibliometría, Temáticas emergentes, Imágenes satelitales, Serie temporal, Análisis de tendencia

CANOPY COVER CLASSIFICATION IN THE WESTERN HIGHLANDS OF SAN LUIS POTOSI USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

José Camilo Cámara Uscanga, MC
Colegio de Postgraduados, 2023

ABSTRACT

The terrestrial cover characterized in an important way by the physiognomy of the vegetation is an expression of the influence of various factors. Remote sensing has currently become one of the main tools for its monitoring and analysis. A review of the intellectual structure of the application of Remote Sensing in vegetation studies was carried out through the analysis of scientific production using bibliometric techniques and the spatio-temporal variability of the annual average NDVI in the Vegetation coverage of the Potosí Altiplano through a time series of Landsat images. Using the Web of Science (WoS) database of scientific publications from 1980 to 2020 and the VOSviewer program, it was identified that the number of scientific publications related to the use of Remote Sensing for the study of vegetation has gradually increased, mainly in recent years. diversifying in their research topics such as the use of time series. To analyze the time series (1993-2021) of the NDVI of the study area, the coefficient of variation and the trend analysis of the Mann-Kendall test were used. The spatial distribution of the NDVI fluctuated between -0.17 to 0.57, where the highest values occurred in agricultural areas and intermediate values in scrublands. The temporal variations of the NDVI fluctuated from 0.18 to 0.22, with the highest values in 2015, while the lowest were observed in 2017. The methods of analysis of time series of satellite images through Remote Sensing techniques suggest that the Vegetation coverage of the area presents a tendency to change in use derived from human activities.

Key words: Bibliometrics, Emerging themes, Satellite images, Time series, Trend analysis

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)** y en especial a la Dirección de Geografía y Medio Ambiente de la Dirección Regional Centro Norte, que me dio una oportunidad laboral, por incentivar siempre la capacitación para el mejoramiento de las habilidades de su personal.

Al **Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí** por otorgarme todas las facilidades para continuar con mi formación académica.

A mi profesor consejero el **Dr. José Pimentel López** por retomar a medio camino este proyecto y brindarnos su apoyo incondicional durante todas sus etapas.

A los asesores integrantes del Consejo Particular el **Dr. Alejandro Amante Orozco** y al **Dr. Esteban Salvador Osuna Ceja** (del INIFAP) por sus sabios consejos y atinados comentarios

Al **Dr. Ángel Bravo Vinaja**, por darme la oportunidad de adentrarnos en otras áreas del conocimiento, permitiéndonos crecer como profesionales y mejorar nuestro trabajo.

Al **Ing. Mario Cruz González** del Instituto de Estadística y Geografía por apoyar nuestra participación en el programa de posgrado de la Maestría en Ciencias en Innovación en Manejo de Recursos Naturales.

A mi compañero de andanzas estudiantiles, **José de Jesús Hernández Ramos** por brindarme su camaradería, conocimiento y apoyo.

A todo el **cuerpo docente y administrativo del Colegio de Postgraduados Campus San Luis Potosí** que se vieron implicados en algún momento de esta travesía ayudándome de manera directa o indirecta en el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones y experiencias vividas a lo largo de nuestra existencia, por estar siempre en nuestros pensamientos y corazones, siendo nuestro apoyo y fortaleza en momentos de dificultad y de debilidad.

A mi familia, y en especial para mi hijo Sebastián, esperando siempre ser para él un ejemplo de superación y perseverancia a pesar de las circunstancias de la vida. Este proyecto no sería posible sin el apoyo incondicional de Norma Angélica, mi compañera de vida y a quién amo, admiro y respeto.

A la memoria del Dr. Benjamín Figueroa Sandoval†, quien impulsó nuestra participación en el programa de maestría, agradezco sus enseñanzas y colaboración.

CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| DEDICATORIA | vi |
| CONTENIDO | vii |
| LISTAS DE CUADROS | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| CAPÍTULO I. APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN EL ESTUDIO DE LA VEGETACIÓN: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO | 10 |
| 1.1 RESUMEN | 10 |
| 1.2 ABSTRACT | 11 |
| 1.3 INTRODUCCIÓN | 12 |
| 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS | 15 |
| 1.4.1 Recopilación de datos | 15 |
| 1.4.2 Depuración de los datos | 16 |
| 1.4.3 Análisis, interpretación y visualización | 18 |
| 1.5 RESULTADOS | 20 |
| 1.5.1 Análisis de producción e impacto | 20 |
| 1.5.2 Análisis de citas conjuntas | 29 |
| 1.5.3. Análisis de co-ocurrencia de palabras | 32 |
| 1.6 DISCUSIÓN | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 1.7 CONCLUSIONES | 41 |
| CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) EN TRES MUNICIPIOS DEL ALTIPLANO POTOSINO | 43 |
| 2.1 RESUMEN | 43 |
| 2.2 ABSTRACT | 44 |
| 2.3 INTRODUCCIÓN | 45 |
| 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS | 49 |
| 2.4.1. Localización de la zona de estudio | 49 |
| 2.4.2. Base de datos y preprocesamiento de imágenes satelitales | 51 |
| 2.4.3. Análisis estadístico | 53 |
| 2.5 RESULTADOS | 55 |
| 2.5.1. Características de la distribución espacial del NDVI | 55 |
| 2.5.2. Características de la distribución temporal del NDVI | 59 |
| 2.5.4. Características de la distribución del coeficiente de variación | 61 |
| 2.5.4. Comportamiento de la tendencia Mann-Kendall monotónica | 64 |
| 2.6 DISCUSIÓN | 66 |
| 2.7 CONCLUSIONES | 72 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 74 |
| LITERATURA CITADA | 76 |

LISTAS DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Lista de países con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación..... | 22 |
| Cuadro 2. Lista de organizaciones con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación. | 23 |
| Cuadro 3. Lista de fuentes con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación..... | 24 |
| Cuadro 4. Lista de las publicaciones más citadas sobre Teledetección de la vegetación. | 26 |
| Cuadro 5. Lista de autores más citados de forma directa en la temática de Teledetección de la vegetación..... | 28 |
| Cuadro 6. Palabras claves y grupos temáticos relacionados a la Teledetección de la vegetación. | 35 |
| Cuadro 7. Porcentaje de distribución de los valores promedio del NDVI en las diferentes coberturas terrestres. | 57 |
| Cuadro 8. Distribución de valores estadísticos en la serie temporal del NDVI..... | 60 |
| Cuadro 9. Porcentaje de distribución espacial del coeficiente de variación del NDVI. ... | 63 |
| Cuadro 10. Porcentaje de distribución espacial de la tendencia del NDVI. | 66 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplo de archivo en formato de texto obtenido de las bases de datos Sciece Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index del Web of Science. | 17 |
| Figura 2. Crecimiento de la publicación de artículos científicos sobre Teledetección de la vegetación 1980-2020. | 21 |
| Figura 3. Mapa con las principales publicaciones en la temática de Teledetección de la vegetación. | 29 |
| Figura 4. Mapa con las principales palabras clave en la temática de Teledetección de la vegetación. | 33 |
| Figura 5. Las principales palabras claves relacionadas a la temática de Teledetección de la vegetación..... | 34 |
| Figura 6. Mapa de localización de los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos, San Luis Potosí, México. | 50 |
| Figura 7. Algoritmo para la obtención de la geomédiana a partir de imágenes satelitales ópticas. | 52 |
| Figura 8. Distribución espacial de los valores promedio del NDVI 1993-2021..... | 56 |
| Figura 9. Variación interanual de los valores promedio del NDVI en los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos, San Luis Potosí, México..... | 61 |
| Figura 10. Distribución espacial del Coeficiente de Variación del NDVI..... | 62 |
| Figura 11. Distribución espacial de la tendencia del NDVI | 65 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

En la superficie terrestre tienen lugar diversos hechos y fenómenos interrelacionados, muchos de los cuales es factible analizar a través del concepto de cobertura terrestre. Este concepto es definido como la "cobertura (bio) física observada" y es una síntesis de los muchos procesos que tienen lugar en la Tierra (di Gregorio, 2016).

La vegetación es un término que se relaciona a la vida vegetal de un área o región, y se refiere específicamente a la cobertura del suelo que proporcionan las plantas, por lo tanto es un atributo observable del paisaje terrestre, a simple vista en el terreno que permite caracterizar un conjunto de condiciones ecológicas diversas, ya que su fisonomía, estructura física y composición florística son una expresión de la influencia de diversos de factores ambientales, regímenes de perturbación e intervenciones humanas. De esta forma, el tipo de vegetación que cubre una porción de la superficie terrestre sirve para caracterizar sus condiciones ambientales y para denominar a su vez tipos de hábitat y tipos de ecosistemas naturales o transformados por la influencia humana (Jardel-Peláez, 2015).

Como se ha mencionado, la vegetación depende fundamentalmente de su entorno físico para su crecimiento, supervivencia, y reproducción; para entender estas respuestas se requieren herramientas tanto para la cuantificación de dicho entorno como para el estudio de las plantas y su funcionamiento. De hecho, existen estudios tan diversos como el mejoramiento en el rendimiento de cultivos y en los procesos de seguimiento y gestión de los ecosistemas, por ejemplo, en respuesta al cambio climático, que requieren una buena comprensión de los mecanismos subyacentes a la respuesta de las plantas al medio ambiente.

Por lo anterior, la Teledetección permite la recopilación de información por un dispositivo separado del objetivo, por lo que se ha posicionado como un componente importante de la batería de tecnologías disponibles para el estudio del sistema de vegetación y su funcionamiento.

La mayor parte de la superficie terrestre está cubierta por vegetación, por lo que se considera uno de los más importantes componentes de los ecosistemas terrestres, por tanto el conocimiento sobre las variaciones en las especies de vegetación y los patrones de distribución de la comunidad, las alteraciones en los ciclos fenológicos (de crecimiento) de la vegetación y las modificaciones en la fisiología y morfología de las plantas proporcionan información valiosa sobre las características climáticas, edáficas, geológicas y fisiográficas de un área. Se han hecho esfuerzos significativos en las últimas décadas para desarrollar sensores y algoritmos de procesamiento de imágenes visuales y digitales para extraer información biofísica importante de la vegetación a partir de datos de Teledetección (Jensen, 2014).

Planteamiento del problema y motivación

Ante diversas circunstancias y necesidades la humanidad ha llevado cambios en los paisajes intentando mejorar la cantidad, la calidad y la seguridad de los recursos naturales críticos para su bienestar, esto mediante el uso cada vez mayor de la innovación. En un principio de forma lenta pero consistente y de forma más reciente aumentado sus capacidades de cambio a un paso más acelerado con el propósito de obtener mayores servicios del medio ambiente y expandir su territorio. Por tanto, se puede decir que existen diferentes grados de actividad humana en los paisajes del mundo, que van desde la transformación extrema de los entornos urbanos hasta la gestión intensiva de áreas agrícolas o la protección cuidadosa de áreas recreativas y parques (Ramankutty et al., 2008).

De acuerdo a la SEMARNAT (2019) los procesos que determinan el cambio en el uso del suelo, los más relevantes son:

- la deforestación (cambio permanente de una cubierta dominada por árboles hacia una que carece de ellos),
- la alteración (también denominada degradación, que es una modificación inducida por causas humanas, pero sin el reemplazo total de la vegetación) y

- la fragmentación (la transformación del paisaje en parches pequeños de vegetación original rodeados de superficie alterada)

En el último reporte de la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) sobre el estado de los bosques a nivel mundial se indica que la cobertura de este ocupa en la actualidad el 30,8% de la superficie terrestre mundial, es decir, una superficie total de 4,060 millones de hectáreas, distribuida de manera desigual en todo el mundo. De esta superficie, como proporción de la superficie total, y que sirve como indicador para los Objetivos del Desarrollo Sustentable, disminuyó del 32,5% al 30,8% en los tres decenios comprendidos entre 1990 y 2020. Esto representa una pérdida neta de 178 millones de hectáreas de bosques. Sin embargo, la tasa media de pérdida neta de bosques ha descendido aproximadamente un 40% entre 1990-2000 y 2010-2020 (de 7,84 millones de hectáreas al año a 4,74 millones de hectáreas al año), como resultado de la reducción de la pérdida de superficie forestal en algunos países y de aumentos de bosques en otros (FAO & PNUMA, 2020).

Por otro lado, para el caso de las tierras secas¹, estas cubren el 41% de la superficie terrestre, o alrededor de 6.1 billones de hectáreas. Estas están distribuidas en todos los continentes, un estimado de 2 mil millones personas viven en ellas y alrededor del 90% se encuentran en países en desarrollo (FAO, 2019).

Las tierras secas enfrentan el serio desafío del deterioro de la vegetación nativa debido al cambio climático y las actividades antropogénicas (El-Beltagy & Madkour, 2012; Huang et al., 2017). Tales actividades han influido significativamente en los patrones de vegetación, la función y los servicios del ecosistema, lo que ha provocado efectos más dañinos en la sostenibilidad del bienestar humano y los recursos naturales en general.

¹ Las tierras secas se definen como aquellas donde la relación entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial media anual, también conocida como índice de aridez (IA), no es superior a 0,65 FAO (2019).

Los ecosistemas áridos se caracterizan por una cobertura de vegetación nativa escasa, limitada debido al clima severo, es decir, alta temperatura y baja precipitación (Mander et al., 2017; Thompson, 2010). Sin embargo, la vegetación nativa de este tipo de ecosistemas juega un papel vital en la lucha contra la desertificación, la promulgación y secuestro de carbono. Además, de que es crucial para comprender las interacciones entre la tierra y la atmósfera, como los impactos del cambio climático, la sequía y la erosión del suelo (Jha & Srivastava, 2018; X. Zhang et al., 2008). Por lo tanto, el monitoreo de la vegetación se considera un paso esencial en las estrategias de restauración para detectar áreas degradadas en las primeras etapas.

Para el caso de México, de acuerdo con la Carta de Uso del Suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) serie VI en el 2014 el 71.4% del país (alrededor de 138 millones de hectáreas) estaba cubierto por comunidades vegetales naturales; la superficie restante, alrededor de 55 millones de hectáreas (poco más del 28% de territorio) había sido transformada a terrenos agropecuarios, áreas urbanas y otros usos del suelo antrópicos. En 2014, los matorrales fueron la formación vegetal predominante (casi el 36% de la superficie natural remanente, lo representa cerca del 26% del territorio); por su parte, los bosques (templados y mesófilos de montaña, 34 millones de hectáreas) y las selvas (húmedas y subhúmedas, 32 millones de hectáreas) ocuparon cerca del 34% del territorio (SEMARNAT, 2019)

En 2014 sólo el 68.5% de la vegetación natural (equivalente al 47.9% del territorio) se conservaba en estado primario. Esta condición corresponde a la vegetación en la cual están presentes la mayor parte de las especies del ecosistema original y los procesos ecológicos no han sido alterados de forma significativa. La vegetación primaria es de gran importancia por su biodiversidad y por sus servicios ambientales (SEMARNAT, 2019).

De acuerdo con la Carta de Vegetación Primaria Potencial, los matorrales xerófilos ocuparon alrededor de 29% del territorio, seguidos de las selvas (28%) y los bosques (25%). Para la década de los setenta (de acuerdo con la Serie 1) se conservaba poco más del 75% de la superficie original de los bosques y 69% de las selvas. Cuarenta

años después, en el 2014, se conservaba casi el 73% de la superficie original de bosques, 57% de las selvas, 89% de los matorrales y casi el 60% de los pastizales; esto representa una pérdida neta de más de 23 millones de hectáreas de selvas, casi 13 millones de bosques, 5.9 millones de matorrales y cerca de 6.7 millones de hectáreas de pastizales. La mayor parte de estas transformaciones ocurrieron antes de los años setenta, no obstante, en las últimas décadas aún se registran pérdidas importantes (mayores a las 50 mil hectáreas anuales) particularmente, en selvas y matorrales (SEMARNAT, 2019).

Ante esta dinámica de cambio, como se ha mencionado, es importante indicar que la vegetación cumple con un gran número de funciones que ayudan a mantener la estabilidad y el correcto funcionamiento del intercambio de materia y energía dentro de cualquier sistema natural. La pérdida y degradación de la vegetación natural, así como la velocidad a la que ocurren dichos cambios, desencadenan procesos negativos —a distintas escalas espaciales y temporales— muchas veces difíciles de revertir (Mathews et al., 2000).

La extensión y distribución de la vegetación natural es una medida básica para conocer el estado ambiental de los distintos ecosistemas y su capacidad para mantener funciones y servicios fundamentales. De ahí la importancia de estudiar, espacialmente, dónde y en qué medida los distintos ecosistemas han sufrido una pérdida total de su vegetación natural o presentan algún nivel de degradación (Mathews et al., 2000; SEMARNAT, 2019).

Una forma de evaluar el impacto de las transformaciones en los ecosistemas terrestres es a partir de la elaboración y análisis de inventarios de uso del suelo. En México se han elaborado inventarios de los diferentes usos del suelo desde hace aproximadamente 40 años por parte del INEGI convirtiéndose en un insumo básico con diferentes propósitos (INEGI, 2017). Sin embargo, debido a que se han utilizado diversas técnicas, herramientas y fuentes los datos pueden no ser totalmente comparables o deberán ser utilizadas con ciertas reservas, pero es posible identificar tendencias.

A la fecha se han generado seis series, la Serie I (elaborada en la década de 1980, la cual se basa en la interpretación de fotografías aéreas); la Serie II (desarrollada en la década de 1990); la Serie III (elaborada en el periodo 2002-2005); la Serie V (obtenida en el periodo 2007-2010); la Serie V (generada en el periodo 2011–2013) y la Serie VI (desarrollada en el periodo 2014 - 2017). Estas últimas cinco series elaboradas a partir de la fotointerpretación de imágenes satelitales de los años 1993, 2002, 2007, 2011 y 2014, respectivamente (INEGI, 2017).

Por otro lado, el INEGI también elaboró la carta de vegetación primaria potencial a escala 1: 1,000,000 que describe la vegetación que probablemente cubría el territorio nacional antes de ser transformada por las actividades humanas (SEMARNAT, 2019).

Este sistema está basado en los trabajos de Rzedowski (1978, 2006), Miranda and Hernández (1963), cuyas propuestas han sido adaptadas a los criterios cartográficos y las necesidades de información del INEGI para sus productos a escala 1:250,000. Dentro del sistema las clases están organizadas en base a las características de los diferentes tipos de vegetación de tal forma que se definen en primer orden los grandes grupos de vegetación que a su vez comprenden los tipos de vegetación con afinidad ecológica y fisonómica:

- Bosque de Coníferas
- Bosque de Encino
- Bosque Mesófilo de Montaña
- Selva Perennifolia
- Selva Subcaducifolia
- Selva Caducifolia
- Selva Espinosa
- Pastizal, Matorral Xerófilo
- Vegetación Hidrófila
- Otros Tipos de Vegetación.

En las últimas décadas, con la llegada de los satélites de Teledetección (como Landsat, MODIS, Sentinel, etc.) ha llevado al desarrollo de instrumentos para

monitorear sistemáticamente la cobertura terrestre desde el espacio que, si bien han ayudado a generar líneas base útiles para las reconstrucciones históricas, por sí mismos no son utilidad para estudiar los cambios en la cobertura terrestre antes de la década de 1970 (Ramankutty et al., 2008).

Con lo hasta ahora planteado es conveniente señalar la importancia de contar con herramientas para evaluar y monitorear los paisajes de México y sus procesos de manera consistente, rápida y a bajo costo. Los instrumentos de Teledetección satelital permiten evaluar y monitorear la cubierta vegetal de manera precisa, repetible y confiable tanto del estado actual como anteriores (Kennedy et al., 2009). Esto gracias a que se cuenta con una gran cantidad de imágenes de satélite que han sido captadas durante las últimas décadas. Sin embargo, dada la heterogeneidad natural del país, todavía hoy esta tarea sigue siendo compleja.

Por otra parte, cada vez se cuenta con más técnicas de monitoreo o análisis y nuevos sensores remotos disponibles (es decir, instrumentos, técnicas englobados bajo el término de tecnologías de la geo-información) (Lemmens, 2011). En este contexto, resulta necesario realizar más investigación al respecto, especialmente enfocada a evaluar la capacidad discriminatoria de los nuevos sensores y técnicas sobre la heterogeneidad de la cubierta vegetal y de manera particular, para sitios como la zona del Altiplano de México.

En diversas partes del mundo se han llevado a cabo estudios que han utilizado la Teledetección para mapear y monitorear la cobertura vegetal a escalas locales y regionales, dependiendo de los diferentes sensores (Abdullah et al., 2018; Lawley et al., 2016; Mitchell et al., 2017; Sruthi & Aslam, 2015; Yildirim & Asik, 2018). Además, los sensores multiespectrales se han utilizado ampliamente para cartografiar la vegetación (Bannari et al., 2002; Chakraborty & Kumar-Sehgal, 2010; Cleland et al., 2007; Karlsen et al., 2009; Myneni et al., 1997; C. J. Tucker et al., 2001).

Sin embargo, una de las restricciones más críticas con respecto al uso generalizado de la aplicación de la Teledetección en estudios de vegetación es la falta de imágenes continuas, la resolución espacial y los efectos del clima (Al-Wassai y Kalyankar, 2013;

Mitchell et al., 2017). El enfoque de la Teledetección basado en series de tiempo de imágenes satelitales ha ganado recientemente incentivos debido a la capacidad de estas técnicas para recolectar imágenes con una alta resolución temporal, espacial y a bajo costo que motiva la mejora del proceso de monitoreo de la vegetación con las subsecuentes ventajas (Colditz, 2007; S. Dech et al., 2015; Gómez et al., 2016; Simoes et al., 2021; Simonetti et al., 2014; Weng, 2018; Woodcock et al., 2020; Yan et al., 2015; Zuñiga-Vásquez & Aguirre-Salado, 2020).

En base a lo anteriormente mencionado y además del hecho de que el territorio del Estado de San Luis Potosí está ubicado en un área de transición que va de la región costera del Golfo de México hasta la Mesa del Centro a través de la Sierra Madre Oriental, propicia la presencia de condiciones geográficas particulares diferentes ajustados a las condiciones socioeconómicas de los pobladores. Además, considerando que la Teledetección es una herramienta valiosa para el monitoreo de la superficie terrestre que proporciona una perspectiva sinóptica y una vista periódica de la superficie de la Tierra se plantearon las siguientes interrogantes de investigación: ¿Cuál es la estructura intelectual actual de la aplicación de técnicas de Teledetección en el mapeo, monitoreo o en la clasificación de coberturas vegetales a nivel mundial que nos permitan identificar sus diferentes temáticas de investigación en dicho campo de trabajo? y de igual forma ¿La aplicación de series de tiempo de imágenes satelitales o el análisis espacio-temporal es una temática de investigación en los estudios de las coberturas vegetales? y ¿Cómo a partir del análisis del comportamiento promedio de los valores de reflectancia expresados a través del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) permiten conocer, analizar y clasificar su variabilidad a través del tiempo a fin de identificar su estado actual, sus tendencias y deducir posibles factores que influyen en su dicho comportamiento?, con el propósito de ayudar a la toma de decisiones y en los procesos de gestión territorial.

Ante estas interrogantes se plantearon como objetivos revisar la estructura intelectual de la aplicación de la Teledetección en los estudios de la vegetación por medio del análisis de la producción científica mediante el uso de técnicas bibliométricas que permitan su análisis, conocimiento, su evolución global y temáticas emergentes; y

describir y analizar el comportamiento promedio temporal y espacial del NDVI en las coberturas vegetales en la zona noroeste del altiplano potosino a través de una serie de tiempo de imágenes Landsat.

En tal sentido el mapeo y monitoreo de coberturas vegetales requiere esfuerzos de síntesis cada vez mayores en diversas escalas por lo que el uso de técnicas de Teledetección juega un papel importante con posibilidades de aplicación que van desde la ocurrencia de especies, la descripción de un hábitat, los patrones espaciales de las comunidades de plantas y la dinámica temporal de la tierra. El desafío es tal vez el cómo transferir a los sistemas operativos que se manejan, por ejemplo, en Instituciones como el INEGI, la CONAFOR, entre otras varias de tal forma les permitan mejorar sus procesos de producción de información geográfica de interés nacional, regional y/o local, que sirvan en los procesos de gestión territorial.

CAPÍTULO I. APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN EL ESTUDIO DE LA VEGETACIÓN: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

1.1 RESUMEN

La Teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para conocer y explorar las características de la dinámica que se establece entre la vegetación y su entorno físico. En este trabajo se llevó a cabo la revisión de la estructura intelectual de la producción científica mediante el uso de técnicas bibliométricas que permitan su análisis, conocimiento, evolución global y futuras líneas de tendencia sobre las investigaciones relacionadas al mapeo y/o monitoreo de la vegetación a través de la Teledetección. Se utilizó la base de datos Web of Science (WoS) como fuente de información de publicaciones científicas de 1980 a 2020 y el programa VOSviewer para el análisis y mapeo bibliométrico. Los resultados indicaron que el número de publicaciones científicas en este campo aumentó gradualmente con los años y luego mucho más rápido en los últimos, diversificándose los campos de aplicación, por ejemplo, a comunidades vegetales específicas, utilizando diversas plataformas de Teledetección o nuevos métodos o algoritmos relacionados al machine learning o aprendizaje automático. Este enfoque metodológico ayudó a revelar detalles de la base teórica del dominio objeto de estudio y captar las temáticas emergentes que se están produciendo.

Palabras clave: Bibliometría, VOSviewer, Temáticas emergentes, Monitoreo terrestre, Imágenes por satelitales,

REMOTE SENSING APPLICATION FOR THE STUDY OF VEGETATION: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

1.2 ABSTRACT

Remote sensing has become a fundamental tool to understand and explore the characteristics of the dynamics established between vegetation and its physical environment. In this work, the review of the intellectual structure of scientific production was carried out through the using of bibliometric techniques that allow its analysis, knowledge, global evolution and future trend lines on research related to mapping and/or monitoring of vegetation. through remote sensing. The Web of Science (WoS) database was used as a source of information on scientific publications from 1980 to 2020 and the VOSviewer program was used for bibliometric analysis and mapping. The results indicated that the number of scientific publications in this field increased gradually over the years and then much faster in recent years, diversifying the fields of application, for example, to specific plant communities, using various remote sensing platforms or new methods or algorithms. related to machine learning or automatic learning. This methodological approach helped to reveal details of the theoretical basis of the domain under study and to capture the emerging themes that are taking place.

Keywords: Bibliometrics, VOSviewer, emerging themes, Research trends, Land monitoring, Satellite images

1.3 INTRODUCCIÓN

La vegetación dependen fundamentalmente de su entorno físico para su crecimiento, supervivencia, y reproducción; para entender estas respuestas se requieren herramientas tanto para la cuantificación de dicho entorno como para el estudio de las plantas y su funcionamiento (Jones & Vaughan, 2010). El mapeo de la vegetación es una herramienta importante para la gestión del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales y la planificación del uso del suelo, ya que dicha vegetación funciona de base para la existencia de todos los organismos vivos y juega un papel fundamental en la dinámica global (Küchler & Zonneveld, 1988). En la actualidad se requiere información precisa sobre las coberturas vegetales o de otros tipos de coberturas con fines científicos. Estas coberturas cambian naturalmente con el tiempo, así como resultado de las actividades humanas. El seguimiento y la cartografía de las coberturas terrestres con sus cambios es posible en la actualidad de una forma consistente y sólida con datos de observación de la tierra, como los que se obtienen a través de la Teledetección (Gómez et al., 2016).

La Teledetección o la Percepción Remota es el proceso de detectar y monitorear las características físicas de un área midiendo su radiación reflejada y emitida a una distancia (generalmente desde un satélite o una aeronave) (Jwan Al-doski et al., 2020). De manera simple, la extracción de información sobre la vegetación a partir de imágenes de Teledetección es el proceso de extraer información de la vegetación principalmente mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales (González & Woods, 2017) . Los pasos generales involucrados en el mapeo de la vegetación incluyen el procesamiento previo de imágenes y la clasificación de imágenes, en este sentido, Xie et al. (2008) señala que en comparación a los métodos tradicionales de inventario y/o monitoreo de recursos naturales (como los levantamientos en campo, revisiones de literatura, interpretación de mapas y análisis de datos auxiliares) la Teledetección ha ofrecido desde hace algún tiempo la capacidad de llevar a cabo los estudios de las coberturas vegetales de una manera práctica y económica que van desde la escala local hasta la global durante ya hace algunas décadas.

Por otro lado, el objetivo de cada área de investigación es analizar, cuantificar y medir los fenómenos comunicativos para construir representaciones formales precisas de su comportamiento con fines explicativos, evaluativos y administrativos. Las diferencias radican en el orden de los factores y los límites del objeto que se mide (Bellis, 2009).

El término de Bibliometría se encarga de analizar de forma cuantitativa todo tipo de datos bibliográficos, como títulos, palabras clave, autores y referencias citadas de artículos científicos y libros, y que se define como “la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos a libros y otros medios de comunicación” (Pritchard, 1969), por tanto el llevar a cabo el análisis de varios aspectos de la literatura científica que nos pueda conducir a una mejor organización de los recursos de información para un uso eficaz y eficiente se plantean varias razones, de acuerdo a Corsini et al. (2019): la primera, se puede obtener una descripción general de la literatura científica a partir de una primera revisión de la bibliografía del campo de investigación pero que no podría ser tan extensa; la segunda las revisiones tradicionales brindan una perspectiva crítica y subjetiva de los artículos científicos seleccionados; y por último es que en la actualidad los estudios tienden a estar cada vez más guiados por datos en lugar de juicios subjetivos sólidos.

Además, continúa indicando Corsini, este proceso de trabajo se ha utilizado para explorar las relaciones y la evolución en la investigación académica a lo largo del tiempo y producir:

- Una descripción visual del estado del arte en un área de investigación;
- Una orientación para que los científicos amplíen su área de interés sobre el tema;
- Iniciar enfoques futuros en el desarrollo de un campo de investigación

Los resultados correspondientes a investigaciones han sido publicados por autores de diversas partes del mundo en un gran número de revistas relacionadas a la temática de la aplicación de la Teledetección en el estudio de la vegetación (Duan et al., 2020; Li et al., 2021; Tamiminia et al., 2020; Xu et al., 2022; Zhao et al., 2022; Zúñiga-Vásquez et al., 2020) como, por ejemplo, por citar algunas como Remote Sensing of

Environment, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Remote Sensing; entre otras varias). Por tanto, para resumir las tendencias globales de investigación sobre la aplicación de técnicas de Teledetección en el estudio de la vegetación y proporcionar una guía potencial para futuras investigaciones, se desarrolló un análisis bibliométrico a los artículos relacionados llevando a cabo búsquedas de artículos en la base de datos Web of Science (WoS) durante el período 1980-2020. Esto nos permitió integrar conocimientos, entendiendo la evolución y tendencias en un campo de investigación. A partir de esto, se plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible evaluar la evolución y los temas emergentes relacionadas con la investigación planteada a través del análisis bibliométrico que permita una mejor comprensión de la literatura científica publicada y que sirva de guía para futuras investigaciones?

En este sentido, el objetivo del presente trabajo es llevar a cabo la revisión de la estructura intelectual de aplicación de la Teledetección en el estudio de la vegetación por medio del análisis de la producción científica mediante el uso de técnicas bibliométricas que permitan su análisis, conocimiento, su evolución global y futuras líneas de investigación sobre el estudio de las coberturas vegetales a través de la Teledetección.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología establecida para el presente trabajo comprende tres fases (de Oliveira et al., 2019; Zupic & Čater, 2015):

- 1) recopilación de datos,
- 2) depuración de los datos, y
- 3) análisis, interpretación y visualización; esto para identificar los estudios más influyentes, con el fin de determinar las áreas temáticas de investigación y proporcionar información sobre los intereses de investigación actuales.

1.4.1 Recopilación de datos

El primer paso de un análisis bibliométrico es identificar los motores de búsquedas y las bases de datos bibliográficas que serán útiles para el propósito de la investigación. La profundidad del análisis bibliométrico se encuentra limitado a la disponibilidad de la información en dichas bases de datos digitales.

Existen diversas fuentes de información bibliográfica disponibles para diversos campos de investigación como: Web of science, Scopus, Dimensions, Google Scholar, OpenAlex, entre muchos otros (Gusenbauer, 2019; Gusenbauer & Haddaway, 2020).

Este estudio utiliza la base de datos Clarivate Analytics Web of Science (WoS) (anteriormente ISI Web of Knowledge). Esta gran base de datos brinda a los usuarios acceso a los registros bibliográficos de los artículos científicos y otros tipos de documentos publicados en revistas indizadas en diferentes bases de datos referenciales en todos los campos científicos. WoS tiene como bases de datos principales el Science Citation Index Expanded (SCIE) y el Social Sciences Citation Index (SSCI), las cuales indizan revistas que tienen un indicador bibliométrico llamado Factor de impacto, el cual se puede consultar en el Journal of Citation Reports (JCR), ello permite clasificar las revistas como revistas allí indizadas como de un nivel superior a las no indizadas. El análisis bibliométrico que se puede realizar con los registros

bibliográficos en el SCIE y SSCI permite obtener datos sobre producción, colaboración, difusión e impacto de la producción científica (Albort-Morant et al., 2017) .

El siguiente paso es la construcción de una expresión de búsqueda, que consiste en una guía que evita obtener resultados extensos o no relevantes ni pertinentes.

Teniendo definido la base de datos bibliográfica a utilizar, se procedió a aplicar la expresión de búsqueda para obtener los documentos pertinentes. Para obtener una minería de “datos de alta calidad”, dicha estrategia debe reflejar de manera confiable el tema de investigación, los objetivos del estudio y los límites del campo de investigación. Los principales criterios de búsqueda utilizados en el análisis bibliométrico son términos específicos del campo de estudio, período de publicación, tipo de documento e idioma y área de conocimiento (de Oliveira et al., 2019).

En esta investigación, los documentos que se consideraron para el análisis, en los que el argumento de búsqueda aparece solo en el título. La expresión de búsqueda fue:

("REMOTE SENSING" AND "VEGETATION") OR TITLE: ("VEGETATION
MONITORING") OR TITLE: ("VEGETATION MAPPING") OR TITLE: ("VEGETATION
ASSESSMENT")

La búsqueda fue ejecutada en diciembre de 2020, obteniendo 904 documentos. El estudio se limitó al análisis únicamente de artículos publicados, aplicando este parámetro de búsqueda se obtuvieron documentos publicados entre 1980 y 2020.

1.4.2 Depuración de los datos

La información obtenida se exportó a un formato de texto (ver Figura 1) para su revisión y depuración, el archivo de base de datos contiene los metadatos bibliográficos disponibles en las bases de datos SCIE y SSCI, en los que se destacan los siguientes: los datos del autor (nombre/es y afiliación/es), el título del artículo, el título de la revista, las palabras clave utilizadas, el resumen y el recuento de citas.

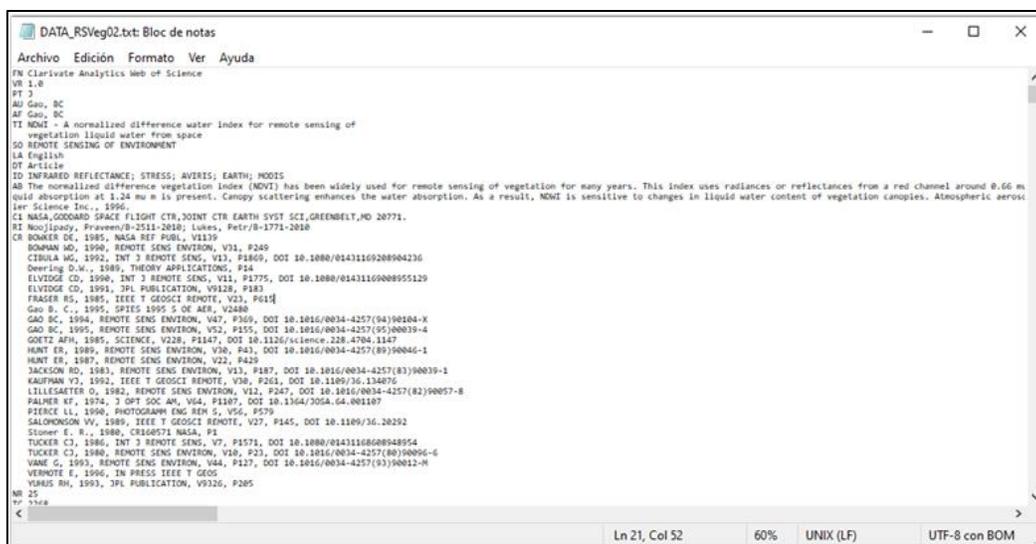


Figura 1. Ejemplo de archivo en formato de texto obtenido de las bases de datos Sciece Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index del Web of Science.

La efectividad de los métodos bibliométricos dependen en gran medida de la calidad de los datos bibliográficos, y la eliminación de ambigüedades, en tal sentido se utilizan herramientas informáticas para eliminar la ambigüedad (Gurney et al., 2012). El objetivo de este paso es optimizar la base de datos para el análisis.

De esta forma, Guzmán-Sánchez (2009) indica que los principales procedimientos para llevar a cabo para la depuración o normalización de la base de datos son:

- Detectar y eliminar registros duplicados
- Errores de consistencia y redundancias
- Datos incompletos

En algunos casos, el filtrado se hace directamente dentro del propio proceso de análisis de los datos. Para esta modalidad se utilizan las facilidades del tesoro, por ejemplo, de instituciones, países, temas o dominios del conocimiento.

Para el caso de la base de datos utilizada, los siguientes ajustes se llevaron a cabo: (i) eliminar registros sin un autor, (ii) eliminar registros duplicados y (iii) eliminar registros de error. Como resultado se eliminaron los registros duplicados; por tanto, la base de datos se redujo a 842 artículos científicos.

1.4.3 Análisis, interpretación y visualización

Como se ha mencionado, la Bibliometría se dirige al estudio del comportamiento de las disciplinas científicas a través de los resultados de las investigaciones, proporcionando indicadores para medir la producción científica y su impacto o influencia en la generación de nuevas investigaciones, aportando una base para evaluación de la investigación y desarrollo. Para llevar a cabo esto utiliza indicadores bibliométricos, los cuales han sido clasificados desde diferentes perspectivas, sin embargo, de forma general, la mayoría se centran en dos agrupaciones: La primera, en función de indicadores de actividad, tales como de producción, visibilidad o colaboración; y la segunda en función de la técnica estadística utilizada en la obtención de estos.

De esta forma, los indicadores de producción, visibilidad e impacto corresponderían a indicadores unidimensionales, y los indicadores de colaboración, así como los indicadores relacionales corresponderían con los indicadores multidimensionales por medio de técnicas estadísticas multivariantes (Gálvez, 2018).

El esquema metodológico utilizado en el presente trabajo se basa en los siguientes indicadores o procesos de análisis:

El *análisis de producción e impacto*; donde se consideraron indicadores unidimensionales como el número de documentos publicados durante el período, países de origen con el mayor número de publicaciones, las instituciones u organizaciones de investigación, las revistas o fuentes, así como los documentos o publicaciones y autores más citados.

También se consideró el *análisis de indicadores multidimensionales* que permiten tener en cuenta, de manera simultánea distintas variables o las múltiples interrelaciones que pueden ser observadas en los documentos, o en los hábitos y necesidades de información de los usuarios (Sanz-Casado & Martín-Moreno, 1998), como el análisis de citas conjuntas y de co-ocurrencias de palabras, elaborando mapas bibliométricos que permiten representar gráficamente las diversas características de

los usuarios a partir del análisis clúster que permitió identificar grupos homogéneos en función de las características de similitud detectadas.

Los indicadores “fuentes con el mayor número de publicación” y “autores más citados” se complementaron con datos que permiten tener una mejor perspectiva del valor de dicha información. En el caso de las revistas o fuentes, se sumó el Factor de Impacto (FI), que resulta de la división entre el número de citas recibidas por una revista en un año específico, y el número de documentos citables publicados en esa revista durante los dos años inmediatamente anteriores (Eugene Garfield, 2006). Para el caso de los autores, se agregó el Índice de Hirsch, más conocido como Índice H, que fue propuesto por Jorge Hirsch para evaluar cualitativamente a investigadores del área de física, y que definió como “el número de artículos publicados por un investigador que muestra más o igual número de citas”, con el objetivo de estimar la importancia, el significado y el impacto de las contribuciones de investigación acumuladas de un científico (Hirsch, 2005).

De los registros bibliográficos resultantes se obtuvieron los indicadores bibliométricos cuantitativos mencionados anteriormente. La base de datos fue analizada a través de la herramienta de software VOSviewer, desarrollado por van Eck y Waltman (Universidad de Leiden) de los Países Bajos, es un software de visualización de unidades de conocimiento de literatura basado en la tecnología de visualización de similitudes (por sus siglas en inglés, VOS), que tiene ventajas únicas en la visualización de dominios de conocimiento de mapas, especialmente en el aspecto de agrupación (van Eck & Waltman, 2010). El algoritmo de clustering de VOSviewer incluye diferentes parámetros de resolución, según el valor que se proporcione para configurarlo. Se ejecutaron varias pruebas introduciendo distintos valores en el parámetro. Por último, los grupos se representaron en un mapa temático bidimensional.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Análisis de producción e impacto

Son los conteos de publicaciones durante un período determinado que relevan información sobre los tipos de documentos, los idiomas, y las revistas de publicación elegidas para la divulgación de la investigación, así como sobre disciplinas en las que se trabaja, tendencias, especialización y el número de autores, instituciones o países, participantes en los documentos, entre otros.

Distribución de publicaciones a lo largo del tiempo

La distribución de publicaciones de carácter académico sobre un tema es un indicador de la tendencia de desarrollo y un reflejo de los posibles cambios que se dan a lo largo del tiempo sobre la temática delimitada, por tanto, al identificar la cantidad de literatura en un período determinado y realizar diversos análisis, se puede comprender en una primera instancia el nivel de investigación y la tendencia de desarrollo futuro en un campo determinado.

A partir de la integración del conjunto de datos y su representación en la Figura 2, se puede observar que la tendencia de las publicaciones en el período de 1980 a 2020 va en crecimiento a lo largo del tiempo, con fluctuaciones que varían en un promedio de cada cuatro años, de este modo se tiene que los años en que se presentaron el menor número publicaciones fueron 1980, 1981 y 1989 con dos de ellas. Por otro lado, los años en que se presentaron el mayor número de publicaciones fueron 2019 y 2020, con 65 y 67 respectivamente, de esta manera hasta este último año se registraron en total 842 publicaciones de tal forma que el 50% del total de publicaciones se llevaron a cabo en los últimos 8 años, es decir a partir del año 2012.

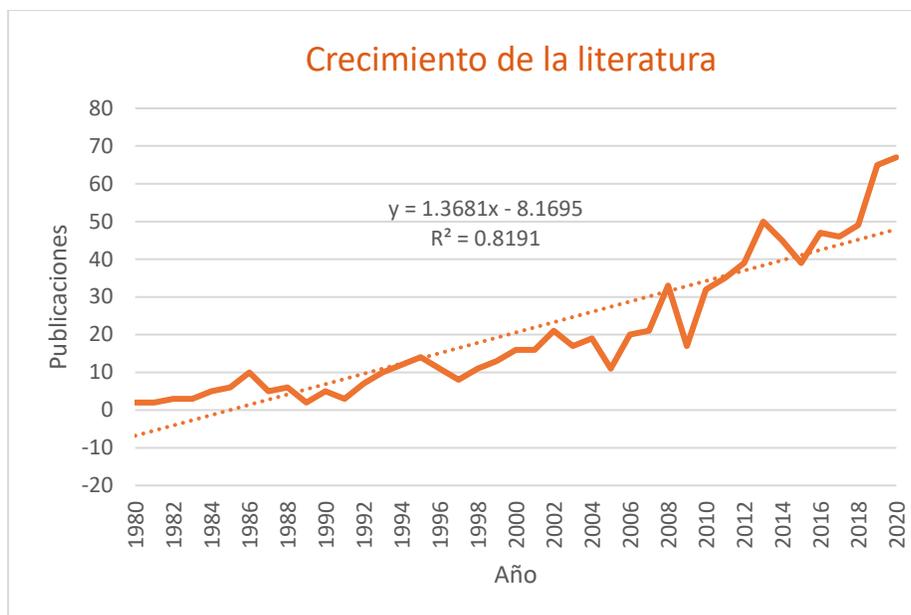


Figura 2. Crecimiento de la publicación de artículos científicos sobre Teledetección de la vegetación 1980-2020.

Países con el mayor número de publicaciones

De acuerdo con los resultados, los registros de las publicaciones cubren un total de 81 países diferentes y 6 grandes regiones, dividiendo al continente americano en dos (América del norte y Latinoamérica). Los 15 países que presentan el mayor registro de publicaciones dentro del período considerado se observan en el Cuadro 1. En la primera posición se encuentran los Estados Unidos con el 25% del total de publicaciones, le sigue China (que en los últimos años ha aumentado considerablemente su participación en este tipo de estudios) aporta un poco más del 13%, lo que representa entre estos dos países casi el 40% del total de publicaciones, y considerando los primeros cinco representarían el 50%. Para el caso de Latinoamérica, sólo se encuentra en la presente lista Brasil que se ubica en el lugar 14 con 18 publicaciones y que representa un 1.68%. Para el caso de México, este no se incluye en el grupo de países por que se ubica en la posición 42 con 9 publicaciones lo que representa un valor menor al 1%.

Cuadro 1. Lista de países con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación.

| Rango | País | Región | Publicaciones | Citas | % |
|--------------|-------------|---------------|----------------------|--------------|----------|
| 1 | USA | América Norte | 268 | 15210 | 25.00 |
| 2 | China | Asia | 143 | 2951 | 13.34 |
| 3 | Australia | Oceanía | 45 | 1491 | 4.20 |
| 4 | Alemania | Europa | 44 | 973 | 4.10 |
| 5 | Italia | Europa | 43 | 1918 | 4.01 |
| 6 | Francia | Europa | 39 | 1141 | 3.64 |
| 7 | Canadá | América Norte | 36 | 1340 | 3.36 |
| 8 | Inglaterra | Europa | 36 | 1407 | 3.36 |
| 9 | India | Asia | 33 | 470 | 3.08 |
| 10 | España | Europa | 27 | 1629 | 2.52 |
| 11 | Japón | Asia | 26 | 706 | 2.43 |
| 12 | Sudáfrica | Africa | 20 | 872 | 1.87 |
| 13 | Bélgica | Europa | 19 | 677 | 1.77 |
| 14 | Brasil | Latinoamerica | 18 | 600 | 1.68 |
| 15 | Holanda | Europa | 18 | 965 | 1.68 |

Organizaciones de investigación con el mayor número de publicaciones

La información sobre las organizaciones con más publicaciones y los grupos que son especializados sobre una temática pueden ser identificados a través del análisis de la cooperación de las organizaciones. Las publicaciones sobre estudios de Teledetección de la vegetación provienen principalmente de 81 organizaciones, siendo las 15 principales con el mayor número de publicaciones, como se indican en la Cuadro 2. En dicho Cuadro se observa que existen dos conjuntos de organizaciones, el primero son Centros Universitarios de Educación como: la Universidad de Arizona, o la Universidad de la Academia de Ciencias de China (UCAS); y el segundo son organizaciones de carácter gubernamental o aquellas instituciones de derecho público o privado fundamentalmente dedicadas a la promoción de las actividades científicas como los estudios dentro de la temática entre ellas están las Academias de Ciencias de China (CAS) y Rusia (RAS), la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos o la Comisión Europea.

Se observa en el Cuadro 2 que hay nueve universidades que han aportado un total de 120 publicaciones que representan el 6.2% del total de publicaciones sobre

Teledetección de la vegetación. El Cuadro también muestra que las universidades e instituciones de Estados Unidos, China, Rusia, Australia y algunos países de Europa son los principales contribuyentes a los estudios dentro de la temática.

Cuadro 2. Lista de organizaciones con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación.

| Rango | Organización | País | Publicaciones | Citas | % |
|-------|--|---------------|---------------|-------|------|
| 1 | Chinese Academy of Sciences (CAS) | China | 66 | 1706 | 3.90 |
| 2 | National Aeronautics and Space Administration (NASA) | USA | 20 | 4734 | 1.18 |
| 3 | University of Arizona (UA) | USA | 19 | 889 | 1.12 |
| 4 | U.S. Geological Survey (USGS) | USA | 18 | 536 | 1.06 |
| 5 | University of the Chinese Academy of Sciences (UCAS) | China | 15 | 187 | 0.89 |
| 6 | Beijing Normal University (BNU) | China | 13 | 174 | 0.77 |
| 7 | Russian Academy of Sciences (RAS) | Rusia | 12 | 57 | 0.71 |
| 8 | University of California, Berkeley (UC) | USA | 12 | 754 | 0.71 |
| 9 | University of Maryland (UMD) | USA | 12 | 590 | 0.71 |
| 10 | Boston University (BU) | USA | 10 | 1003 | 0.59 |
| 11 | USDA Agricultural Research Service (USDA ARS) | USA | 10 | 861 | 0.59 |
| 12 | The University of Melbourne | Australia | 9 | 195 | 0.53 |
| 13 | Commission European Communities (EC) | Unión Europea | 8 | 946 | 0.47 |
| 14 | New Mexico State University (NMSU) | USA | 8 | 196 | 0.47 |
| 15 | Universitat de València (UV) | España | 7 | 405 | 0.41 |

Fuentes con el mayor número de publicaciones

El Cuadro 3 muestra las principales fuentes en términos de publicaciones relevantes totales (358 publicaciones, es decir un poco más del 42%), el número de citas y factor de impacto (E. Garfield, 1972); el resto de las publicaciones fue hecho por 293 fuentes. Las cuatro primeras fuentes agrupan poco más del 26% del total de publicaciones, de esta forma el 50 % de las publicaciones se acumulan en 28 fuentes, resaltando el hecho que International Journal of Remote Sensing ocupa el primer lugar en cuanto al número de publicaciones, sin embargo, ocupa el octavo lugar en relación con el factor de impacto, por otro lado, Remote Sensing of Environment ocupa el segundo lugar en la lista en base a número de publicaciones y el primero por su factor de impacto. Otras fuentes que se destacan en términos del factor de impacto son: ISPRS Journal of

Photogrammetry and Remote Sensing (6.942) y IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (5.630).

Cuadro 3. Lista de fuentes con el mayor número de publicaciones sobre Teledetección de la vegetación.

| Rango | Fuentes | País | Publicaciones | Citas | % | Factor de Impacto |
|-------|---|----------------|---------------|-------|-------|-------------------|
| 1 | International Journal of Remote Sensing | Inglaterra | 97 | 4388 | 11.52 | 2.493 |
| 2 | Remote Sensing of Environment | Estados Unidos | 52 | 7984 | 6.18 | 8.218 |
| 3 | Remote Sensing | Suiza | 50 | 1195 | 5.94 | 4.118 |
| 4 | Photogrammetric Engineering and Remote Sensing | Estados Unidos | 22 | 863 | 2.61 | 1.367 |
| 5 | Environmental Monitoring and Assessment | Holanda | 20 | 435 | 2.38 | 1.959 |
| 6 | IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing | Estados Unidos | 20 | 1262 | 2.38 | 5.630 |
| 7 | Ecological Indicators | Polonia | 16 | 489 | 1.90 | 1.467 |
| 8 | Applied Vegetation Science | Inglaterra | 14 | 207 | 1.66 | 3.568 |
| 9 | ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing | Holanda | 13 | 706 | 1.54 | 6.942 |
| 10 | International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation | Estados Unidos | 12 | 306 | 1.43 | 3.392 |
| 11 | Journal of Applied Remote Sensing | Estados Unidos | 9 | 199 | 1.07 | 1.344 |
| 12 | Journal of Arid Environments | Estados Unidos | 9 | 434 | 1.07 | 1.825 |
| 13 | Spectroscopy and Spectral Analysis | China | 9 | 31 | 1.07 | 0.434 |
| 14 | Journal of Vegetation Science | Inglaterra | 8 | 247 | 0.95 | 2.944 |
| 15 | ISPRS International Journal of Geo-information | Suiza | 7 | 29 | 0.83 | 1.840 |

Publicaciones y autores más citados

El Cuadro 4 muestra una selección de las publicaciones más citadas las principales fuentes en términos de publicaciones relevantes totales (358 publicaciones, es decir un poco más del 42%), el número de citas y factor de impacto (Garfield, 1972); el resto de las publicaciones fue hecho por 293 fuentes.

De las publicaciones más citadas se observa que de estos el más citado corresponde a Gao (1996) con un total de 2303 citas recibidas. Se trata de un artículo publicado en la revista Remote Sensing of Environment en el cual se propone el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). Para su cálculo, utiliza dos bandas infrarrojas (una banda NIR en alrededor de 840-860 nm, y otra en 1630-1660 nm) en una fórmula muy similar al índice mucho más conocido como el NDVI. El segundo artículo más citado es el Gitelson et al. (1996), en este se propone el uso de la banda verde que está altamente correlacionada con el contenido de clorofila. El resto de los documentos más citados tratan en mayor o menor medida en el uso potencial de los índices de vegetación como una técnica para explorar las características de la vegetación a través de técnicas de Teledetección.

En el Cuadro 5 se muestra también una lista de los autores más citados en forma directa. Se resalta Bo-Cai Gao, el mismo autor de la publicación más citada, quien se desempeña como investigador en la División de Percepción Remota del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos. También es miembro del Equipo Científico Suomi VIIRS de la NASA, donde se centra en la detección remota de nubes cirrus.

El siguiente investigador más citado es Yoram Kaufman con un índice H de 119 (el más alto de los primeros 15 autores), fue un científico investigador y miembro principal de Goddard Space Flight Center de 1979 a 2006, sus intereses se centraron en la Teledetección de aerosoles atmosféricos y sus efectos en el clima de la Tierra. Fue miembro original del equipo científico del programa de los satélites MODIS. Ambos investigadores llevaron a cabo varios trabajos conjuntos todos muy relacionados al uso de los productos del satélite MODIS.

Cuadro 4. Lista de las publicaciones más citadas sobre Teledetección de la vegetación.

| Rango | Título | Autores | Revista | Año | Total | Promedio |
|--------------|---|---|--|------------|--------------|-----------------|
| 1 | NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space | GAO, Bo-Cai | Remote Sensing Environment | 1996 | 2303 | 88.58 |
| 2 | Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS | GITELSON, Anatoly A. | Remote Sensing Environment | 1996 | 958 | 36.85 |
| 3 | Exploring A V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote-sensing - comparative anatomy for cities | RIDD, Merrill K. | International Journal of Remote Sensing | 1995 | 661 | 24.48 |
| 4 | Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle | BERNI, Jose A. J. et al | IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing | 2009 | 628 | 48.31 |
| 5 | Predictive vegetation mapping: Geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients | FRANKLIN, Janet | Progress in Physical Geography | 1995 | 586 | 21.7 |
| 6 | Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review | XIE, Yichun; SHA, Zongyao; YU, Mei | Journal of Plant Ecology | 2008 | 553 | 39.5 |
| 7 | Object-based detailed vegetation classification. with airborne high spatial resolution remote sensing imagery | YU, Qian, et al | Photogrammetric Engineering and Remote Sensing | 2006 | 505 | 31.56 |
| 8 | Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review | ADAM, Elhadi; MUTANGA, Onesimo; RUGEGE, Denis | Wetlands Ecology and Management | 2010 | 419 | 34.92 |
| 9 | Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems | STOW, Douglas A., et al | Remote Sensing of Environment | 2004 | 414 | 23 |

| Rango | Título | Autores | Revista | Año | Total | Promedio |
|--------------|--|--|---|------------|--------------|-----------------|
| 10 | Remote-sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas | Kogan, FN | Internationa Journal of Remote Sensing | 1990 | 379 | 11.84 |
| 11 | Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 - Theoretical approach | CECCATO, Pietro, et al | Remote Sensing of Environment | 2002 | 361 | 18.05 |
| 12 | Thermal remote-sensing of surface soil-water content with partial vegetation cover for incorporation into climate-models | GILLIES, Robert R.; CARLSON, Toby N. | Journal of Applied Meteorology | 1995 | 311 | 11.52 |
| 13 | In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote-sensing of vegetation | BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. | International Journal of Remote Sensing | 1993 | 286 | 9.86 |
| 14 | Remote-sensing of teperate coniferous forest leaf-area index - The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance | BUSCHMANN, C.; NAGEL, E. SPANNER, Michael A., et al | International Journal of Remote Sensing | 1990 | 279 | 8.72 |
| 15 | Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals | SERRANO, Lydia; PENUELAS, Josep; USTIN, Susan L. | Remote Sensing Environment | 2002 | 255 | 12.75 |

Otro de los autores más citados es Anatoly Gitelson con índice H de 88, quien actualmente se desempeña como miembro de la Universidad de Nebraska en los Estados Unidos, presenta una amplia experiencia en el área de la Teledetección de ambientes acuáticos y terrestres, junto con Yoram Kaufman y Mark N. Merzlyak publicaron uno de los artículos más citados, en donde llevan a cabo la propuesta de un nuevo índice de vegetación al utilizar la banda verde para detectar la concentración de clorofila, medir la tasa de fotosíntesis y monitorear el estrés de las plantas.

Cuadro 5. Lista de autores más citados de forma directa en la temática de Teledetección de la vegetación.

| Rango | Autor | Organización | País | Publicaciones | Citas | % | H-índice |
|-------|-----------------------|--|----------------|---------------|-------|------|----------|
| 1 | Bo-cai Gao | Naval Research Lab | Estados Unidos | 1 | 2303 | 2.96 | 12 |
| 2 | Yoram J. Kaufman | NASA | Estados Unidos | 2 | 1084 | 1.39 | 111 |
| 3 | Anatoly A.Gitelson | Israel Institute of Technology | Israel | 1 | 958 | 1.23 | 96 |
| 4 | Mark N. Merzlyak | Moscow State University | Rusia | 1 | 958 | 1.23 | 40 |
| 5 | Steven W. Running | The University of Montana | Estados Unidos | 5 | 818 | 1.05 | 142 |
| 6 | Merrill K. Ridd | University of Utah | Estados Unidos | 2 | 711 | 0.91 | 6 |
| 7 | Pablo J. Zarco-Tejada | University of Melbourne | Australia | 2 | 683 | 0.88 | 61 |
| 8 | Janet Franklin | University of California | Estados Unidos | 2 | 666 | 0.86 | 53 |
| 9 | Jose A. Jimenez-Berni | Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC | España | 1 | 628 | 0.81 | 15 |
| 10 | Elías Fereres Castiel | Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC | España | 1 | 628 | 0.81 | 88 |
| 11 | Lola Suarez | University of Melbourne | Australia | 1 | 628 | 0.81 | 17 |
| 12 | Bernard Pinty | EC-Joint Research Centre | Francia | 4 | 615 | 0.79 | 66 |
| 13 | Nadine Gobron | Joint Research Centre of the European Commission | | 3 | 597 | 0.77 | 60 |
| 14 | Lars L. Pierce | University of Montana | Estados Unidos | 3 | 587 | 0.75 | |
| 15 | Pietro Ceccato | Columbia University | Estados Unidos | 2 | 577 | 0.74 | 31 |

Steven W. Running se encuentra en una quinta posición de los autores más citados, sin embargo, presenta el índice H más alto, alcanzando 142. Es un profesor emérito de la Universidad de Montana y cuyo principal interés de investigación es el desarrollo de modelos biogeoquímicos de ecosistemas globales y regionales que integren la

Teledetección con la bioclimatología y la ecología terrestre. Tuvo una importante participación en el programa de monitoreo de la tierra MODIS.

1.5.2 Análisis de citas conjuntas

Este tipo de análisis asume que entre dos o más documentos que son citados en un trabajo posterior, se establece una similitud temática; y cuanto mayor sea la frecuencia de citas conjuntas mayor será la afinidad entre ellos (Miguel et al., 2007). De esta forma, utilizando el programa VOSviewer se generó la matriz de co-ocurrencia normalizada y la red de citas conjuntas de documentos (Figura 3). El color de los nodos identificó el grupo con el que cada documento estuvo asociado. Cada nodo se distinguió con el primer autor y el año de publicación del artículo. Los nodos de mayor tamaño se corresponden con las referencias con un elevado número normalizado de citas recibidas, y se identifican con los documentos con mayor nivel de asociación y similitud temática. Se obtuvo una red de citas conjuntas de referencias dividida en cuatro grupos, cada uno de los cuales se nombró en función de las referencias citadas.

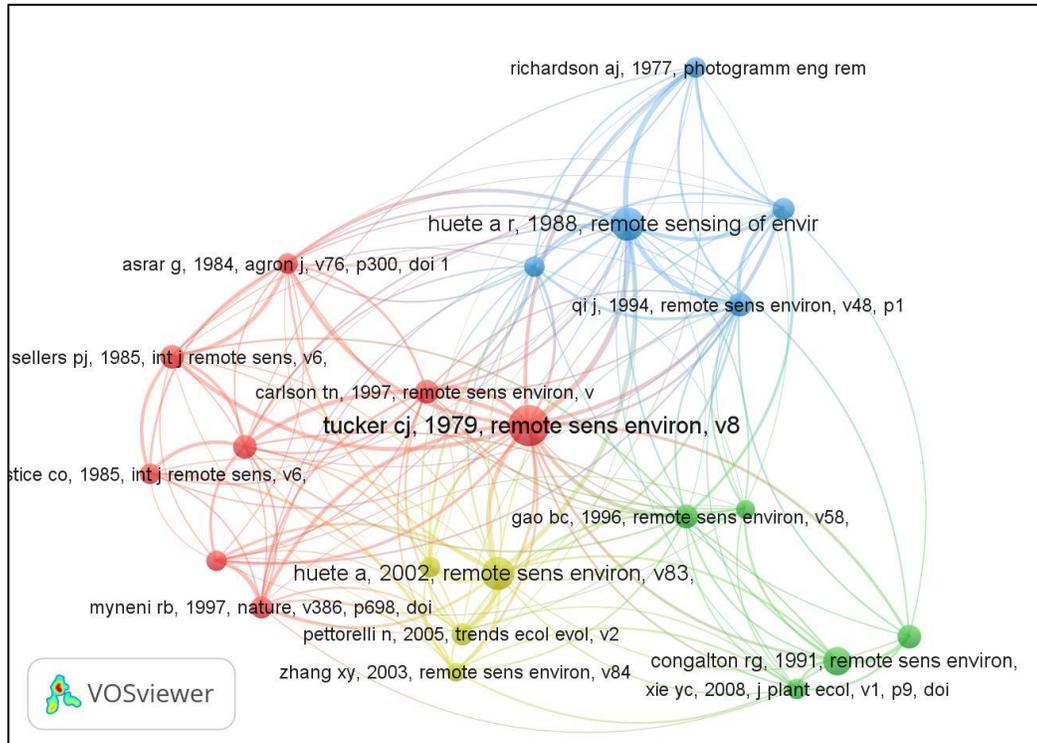


Figura 3. Mapa con las publicaciones más citadas en la temática de Teledetección de la vegetación.

Cluster 1. El uso de las combinaciones lineales del rojo e infrarrojo fotográfico para monitorear la vegetación

Este grupo fue el que reunió el mayor número de referencias citadas, incluyó en total 8 documentos vinculados con las bases experimentales de la creación de los índices de vegetación y su correlación con las medidas de radiancia de las imágenes de satélite existentes (Landsat) con las obtenidas en parcelas experimentales. El “Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation” de Tucker (1979) publicado en Remote Sensing Environment presentó un número 85 de co-citaciones con la mayor fuerza de enlace total (65), esto sugiere que la publicación presenta una posición importante en la estructura de red de co-citación.

En la publicación mencionada se evalúa y cuantifica las relaciones entre varias combinaciones lineales de valores de radiancias rojas e infrarrojas fotográficas y la biomasa, el contenido de agua de las hojas en parcelas experimentales (Compton J. Tucker, 1979). Todas resultaron muy similares para estimar la biomasa fotosintéticamente activa. Las propiedades asintóticas de la relación IR/rojo, raíz cuadrada de la relación IR/Rojo, diferencia IR-rojo, VI y TVI fueron muy similares para situaciones de biomasa verde.

Cluster 2: Evaluación de la precisión de las clasificaciones de datos de Teledetección

Este grupo reunió 5 documentos vinculados a las técnicas de evaluación de la exactitud de los resultados obtenidos de los procesos de clasificación a partir de los datos de Teledetección, es decir a la aplicación de técnicas cuantitativas de valoración de los productos obtenidos. Destaca en este grupo el trabajo teórico planteado por (Congalton, 1991), publicado en Remote Sensing Environment, el cual presentó un total de co-citaciones de 42 y una fortaleza de enlace 15 que deriva en la importancia de sus planteamientos. Cabe también destacar la publicación de Gao (1996) “NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space” el cual presenta un total de 29 co-citaciones y una fortaleza de enlace de 18, es decir, superior a la del artículo de Congalton. Sin embargo, es necesario utilizar la Teledetección para proyectos mucho más grandes, como el seguimiento del

calentamiento global, la deforestación y la degradación ambiental. Se desconocen todos los problemas que surgirán al trabajar en áreas grandes. Ciertamente, las técnicas descritas deben ampliarse y perfeccionarse para satisfacer mejor estas necesidades de evaluación. Es fundamental que continúe este trabajo y el uso del análisis cuantitativo de datos de Teledetección (Congalton, 1991).

Cluster 3: Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

En este grupo, el documento más representativo y que tiene la mayor densidad es el de “Índice de Vegetación Ajustado al suelo (SAVI)”, los números de citas conjuntas que presenta es de 55, y la fortaleza de enlace total es de 50. De esta forma en áreas donde hay variaciones considerables de brillo del suelo como resultado de diferencias de humedad, variaciones de rugosidad, sombras o diferencias de materia orgánica, existen influencias inducidas por el suelo en los valores del índice de vegetación. Las diferencias en las transferencias del flujo rojo y NIR a través de un dosel dan como resultado una interacción compleja suelo-vegetación, en este sentido el dosel de la vegetación dispersará y transmitirá una cantidad significativa de flujo NIR hacia la superficie del suelo, irradiando el suelo por debajo y entre plantas individuales. Posteriormente, el suelo refleja parte de este flujo disperso y transmitirá hacia el sensor de una manera que depende de las propiedades ópticas de la superficie. Por el contrario, la luz roja es fuertemente absorbida por las capas superiores de las hojas del dosel, y la irradiancia en la superficie del suelo se limita a la recibida directamente del sol y el cielo a través de los huecos del dosel.

Cluster 4: Rendimiento radiométrico y biofísico de los índices de vegetación MODIS

En este grupo, el documento que tiene la mayor densidad es “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices”, publicado por Remote Sensing Environment, los valores de la red de co-citación son de 53 y la fortaleza de enlace de 40. Aquí se plantea que con la puesta en marcha de satélites como el MODIS su objetivo es estudiar el papel de la vegetación terrestre en los procesos globales a gran escala con el objetivo de comprender cómo funciona la Tierra como un sistema, por lo que los productos generados, como los índices NDVI y EVI, a

partir de sus datos están diseñados para proporcionar comparaciones constantes, espaciales y temporales de las condiciones globales de la vegetación que pueden utilizarse para monitorear la actividad fotosintética.

1.5.3. Análisis de co-ocurrencia de palabras

El análisis de co-ocurrencia de palabras clave se utiliza para analizar la fuerza del vínculo entre palabras clave de co-ocurrencia mediante el estudio de su relación de co-ocurrencia en un gran número de documentos (Small, 1973). Su propósito es describir la relación y estructura de la composición interna en un determinado dominio académico, así como revelar los frentes de investigación de esa disciplina (Gálvez, 2018). El frente de investigación se refiere a la combinación conceptual de un tema de investigación provisional y sus problemas básicos de investigación, así como las tendencias teóricas emergentes o inesperadas y los nuevos temas (Martín-Armario et al., 2006). Se generó la red de co-ocurrencia de las palabras clave de las publicaciones relacionadas utilizando VOSviewer. La tecnología de detección remota hiperespectral demuestra la capacidad de identificación precisa de la vegetación. En la Figura 4, se observan los temas que resaltan en el campo de la Teledetección de la vegetación como: ndvi, vegetation mapping, vegetation index, modis, hyperspectral, landsat, entre otros.

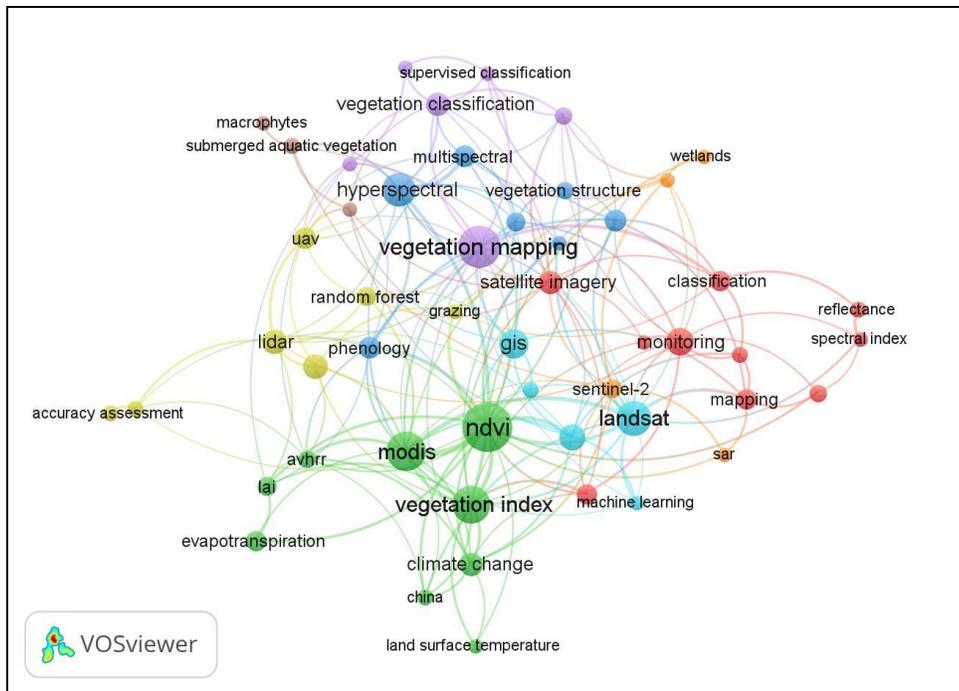


Figura 4. Mapa con las principales palabras clave y sus relaciones en la temática de Teledetección de la vegetación.

En la muestra de los 842 artículos se obtuvo un total de 2105 palabras clave definidas por los autores de las publicaciones. Para simplificar la representación de las complejas estructuras de conocimiento se seleccionaron sólo las palabras clave cuya frecuencia fuera ≥ 5 (un umbral más bajo hubiera dado lugar a una lista larga de palabras clave y a un mapa complejo difícil de visualizar e interpretar). Previamente, y antes de visualizar la red de co-palabras, se eliminaron manualmente las palabras-clave “remote sensing”, por estar relacionada con la mayor parte de los items. Se obtuvieron un total de 52 palabras clave (Figura 5).

Los enlaces muestran las relaciones de co-ocurrencia entre cada dos palabras-clave y el color de los nodos muestran el grupo o cluster al que cada palabra clave se vinculó. El tamaño de las etiquetas y el diámetro de los círculos fueron proporcionales a la frecuencia y a la fuerza de las conexiones de las respectivas palabras clave. Cada uno de los ocho conglomerados se nombró en función de la mayoría de las palabras clave que lo formaron. En la interpretación del mapa se tuvo en cuenta el número de palabras

clave dentro de cada grupo temático, el número de ocurrencias de cada palabra clave, su interrelación y su localización espacial. Los diferentes agregados revelaron los contenidos reales y los temas de investigación de los documentos (Cuadro 6), los conglomerados situados en el centro de los mapas indicaron las áreas temáticas de mayor actividad científica:

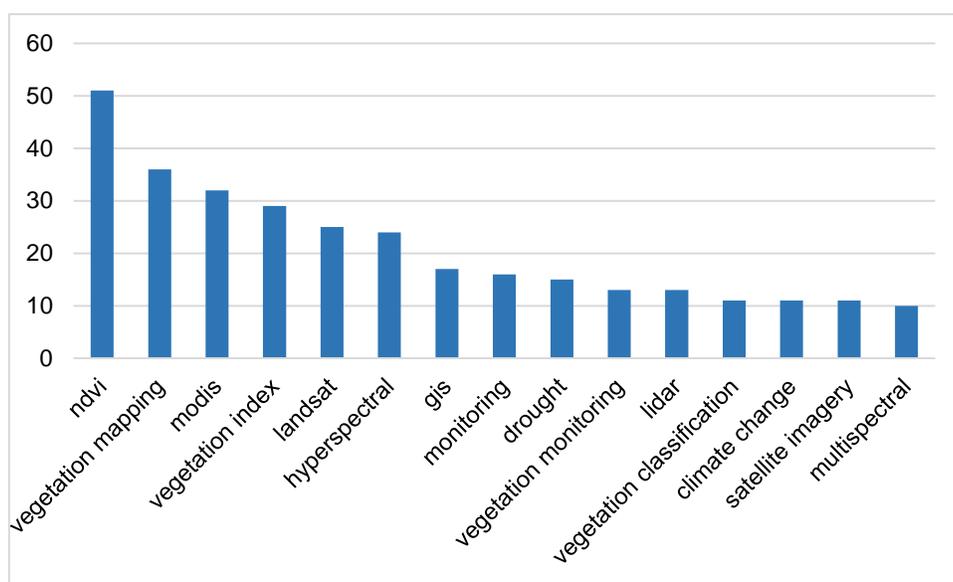


Figura 5. Las principales palabras claves relacionadas a la temática de Teledetección de la vegetación

Cuadro 6. Palabras claves y grupos temáticos relacionados a la Teledetección de la vegetación.

| Palabras claves seleccionadas | Grupo temático | Cluster | Comentario |
|--|--|---------------------|--|
| monitoring, satellite imagery, mapping, classification, vegetation cover, spectral index, vegetation dynamics, leaf area index, reflectance, time series | La Teledetección en el monitoreo de la dinámica de la vegetación | 1 (rojo) | Este grupo resalta la importancia de conocer la dinámica de la vegetación a través de la métrica fenológica considerando parámetros como la índice área foliar |
| ndvi, modis, vegetation index, climate change, avhrr, china, lai, evapotranspiration, land surface temperature | NDVI en el monitoreo del cambio climático | 2 (verde oscuro) | NDVI derivado de datos satelitales es un indicador importante que se utiliza para analizar las condiciones de crecimiento de la vegetación y revelar la respuesta de la dinámica de la vegetación al cambio climático |
| hyperspectral, phenoly, land cover, multispectral, forest, spectral mixture analysis, vegetation structure | La Teledetección hiperespectral | 3 (azul) | Lograr una buena separabilidad espectral en diversos ambientes se resalta el uso de la tecnología de Teledetección hiperespectral que demuestra mayores capacidades para identificar con mayor precisión los tipos de vegetación |

| Palabras claves seleccionadas | Grupo temático | Cluster | Comentario |
|--|---|--------------------|--|
| lidar, uav, grazing, random forest, vegetation monitoring, climate, accuracy assessment | Nuevas plataformas de Teledetección | 4 (verde claro) | Se destaca el uso de UAV y el LiDAR para la estimación precisa de parámetros de vegetación (como los pastizales) con una alta resolución espacial |
| vegetation mapping, vegetation classification, change detection, arctic, supervised classification, vegetation map | Teledetección en ecosistemas árticos y detección del cambio | 5 (magenta) | Utilidad de los datos de Teledetección para modelar y analizar la estructura y función de los ecosistemas de las zonas frías considerando sus características particulares muchas veces limitada por sus condiciones geográficas propias |
| landsat, drought, gis, machine learning, riparian vegetation | Teledetección en zonas secas y aprendizaje automático | 6 (cyan) | delimitan principalmente el uso de técnicas de Teledetección aplicados al estudio y análisis de la vegetación en tierras secas, resaltando los trabajos enfocados a la vegetación de ribereña |
| sentinel-2, multitemporal, sar, wetlands | Teledetección en zonas húmedas e imágenes de radar | 7 (naranja) | Técnicas tradicionales de Teledetección (imágenes ópticas) pueden ser utilizadas para estudiar la vegetación en zonas húmedas, sin embargo, aquí se resalta el uso de las imágenes de radar de apertura sintética (obtenidas a través de plataformas como el Sentinel), dado que no se ven afectadas por las |

| Palabras claves seleccionadas | Grupo temático | Cluster | Comentario |
|--|---|---------------|--|
| object-based image analysis, submerged aquatic vegetation, macrophytes | Teledetección en ecosistemas acuáticos y análisis basado en objetos | 8 (marrón) | <p>condiciones meteorológicas propias de estos ecosistemas, como son la alta nubosidad y humedad ambiental</p> <p>Las técnicas de Teledetección tradicionales pocas veces se han utilizado para mapear y monitorear, por ejemplo, la vegetación acuática sumergida (SAV) en los ríos, debido a la resolución espacial de las imágenes y la fuerte atenuación de la luz en el agua. Se destacan la disponibilidad de imágenes satelitales que permiten clasificar parámetros de forma y textura para ayudar a discriminar especies al adoptar técnicas análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) y superar algunas de las limitaciones actuales</p> |

1.6 DISCUSIÓN

En este estudio, se realizó un análisis bibliométrico y de contenido para extraer información interesante sobre la colección de todas las publicaciones sobre el uso de la Teledetección aplicada al monitoreo o evaluación de la vegetación publicadas por investigadores en la base de datos Web of Science para un período de 40 años (1980-2020).

El número de publicaciones científicas en este campo de investigación aumentó gradualmente con los años y luego rápidamente los últimos años 2010-2020 se ha incrementado el número de artículos por año, similar a resultados presentados por Xu et al. (2022). Esto se explica en parte a lo comentado por Pham-Duc and Nguyen (2022) que la nueva política de datos gratuitos de las principales agencias espaciales, como la NASA y la ESA, ayudó a científicos acceder a datos e imágenes de sensores remotos satelitales, que antes eran limitados.

Durante este período es claro la importante participación de países como Estados Unidos, dado que fue en este dónde se iniciaron los principales programas de monitoreo de la Tierra a través de la Teledetección y donde se implementaron las primeras técnicas de análisis o el uso de índices de vegetación. Sin embargo, hay que observar también el caso de China, donde Xu et al. (2022) obtuvo resultados similares, indicando que al menos en los últimos años ha aumentado considerablemente su participación en este tipo de estudios, siendo la Chinese Academy of Sciences (la Academia de Ciencias de China), unas de las organizaciones con el mayor número de publicaciones.

Dentro de los autores más citados se observó que, aunque algunos de ellos son altamente citados su evaluación a través del índice H no es la misma, así tenemos por ejemplo Bo-Cai Gao que presenta un índice H igual a 1, caso contrario se encuentra Steven W. Running que presenta el índice H más alto, de 142; siguiendo en esta línea se encuentra Kaufman Yoram J. con 119 y Anatoly A. Gitelson con 96, quienes ocupan el segundo y tercero lugar de los autores más citados respectivamente, con esto se quiere decir que la trascendencia o la valoración científica de un autor se visualiza de mejor manera a través del índice H que representa su biografía científica, y que por lo

tanto no mide la inmediatez o la trascendencia de un artículo científico si no que se evalúa la relevancia de su producción científica a lo largo del tiempo (Gálvez Toro & Amezcua, 2006).

De las 10 fuentes principales, las de mayor impacto de acuerdo con el factor JCR son Remote Sensing of Environment, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing y IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Este factor es una medida de la calidad científica para evaluar las fuentes o revistas académicas que proporciona el Journal Citation Report. Donde de acuerdo a los datos presentados resultados similares se dieron por parte de Xu et al. (2022), con el trabajo Bibliometric analysis of global NDVI research trends from 1985 to 2021, donde hace un análisis de la literatura científica aplicado al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

En este documento, al recuperar la literatura relevante sobre la aplicación de la Teledetección a la vegetación, reveló los temas emergentes en el conocimiento que subyace en este campo de investigación, así se tiene que los tres primeros grupos de mayor relevancia presentan una fuerte correlación temática. El cluster 1 trata sobre la dinámica de la vegetación que significa el analizar varios parámetros, como la lluvia, la temperatura del suelo, la humedad del suelo y la tendencia de crecimiento de vegetación nativa o cultivos a lo largo del tiempo utilizando datos de diferentes sensores y métodos, como el análisis de regresión y el análisis de gráficos de tendencias para su posterior representación cartográfica; comprender cómo interactúan estos factores que influyen en la coexistencia y productividad de las especies es un área importante de la investigación (Dhar et al., 2021). Por otro lado está el cluster 3 que incluye el término phenology, es decir la fenología de las plantas, que se expresa a través del registro del momento de los eventos del ciclo de vida de las plantas (Situch et al., 2022; Xiao et al., 2022), como la floración o el follaje, por lo tanto, juega un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, donde la mayoría de los datos de fenología provienen de alguna de las siguientes fuentes: observaciones terrestres, sensores remotos satelitales o aéreos, fotografía digital automatizada repetida y de colecciones históricas de especímenes de plantas (Stucky et al., 2018). Esto amalgamado a través de los términos NDVI e índices de vegetación (Xu et al., 2022) que se contemplan en los

clusters 2 y 1, que en términos generales se definen como combinaciones de los valores de reflectancia de la superficie terrestre en dos o más longitudes de onda diseñadas para resaltar una propiedad particular de la vegetación y que por lo tanto, se utilizan (entre otros métodos) para el monitoreo de la vegetación y la dinámica de su producción primaria (Jones & Vaughan, 2010; Pettoreli, 2013; Xue & Su, 2017).

Algo importante de resaltar al llevar a cabo el análisis de citas conjuntas, es la conexión intelectual entre el universo de publicaciones analizadas y las citadas por dichas publicaciones. El análisis de citas conjuntas de acuerdo a Miguel et al. (2007) es una forma de co-ocurrencia (o coincidencia en la aparición de palabras, autores o referencias) dentro de un conjunto de metadatos, que delimitan una disciplina o área de investigación en particular. Al llevar a cabo dicho análisis resaltó la publicación de Congalton (1991) “A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data” como parte importante del cluster 2 sobre la evaluación de la precisión de las clasificaciones de datos de Teledetección. Dicha publicación aun cuando no se encuentra dentro de la lista de publicaciones obtenidas por la búsqueda, es una publicación muy citada por el conjunto de publicaciones analizadas, es decir, por ser una publicación citada de forma conjunta por los autores de las publicaciones analizadas u obtenidas en la búsqueda se pudo observar la relación teórica-metodológica (intelectual) entre ellas.

Los siguientes clústeres de mayor relevancia se circunscriben a las aplicaciones de la Teledetección que tienen que ver en diferentes ámbitos con comunidades vegetales específicas como los pastizales (Masenyama et al., 2022; Nduku et al., 2021), de zonas frías (tundra) (Nelson et al., 2021) y secas (vegetación ribereña) (Huylenbroeck et al., 2020; Pedraza et al., 2021; Shi et al., 2022), de humedales y/o acuática (Ogashawara, 2021), entre otras. También se contemplan en dichos grupos el uso de nuevas plataformas de Teledetección como LiDAR (sistema de medición y detección de objetos mediante láser, UAV o traducido como vehículos aéreos no tripulados (A. P. Singh et al., 2022), radar o las plataformas de imágenes ópticas de mayor resolución como el Sentinel (Pham-Duc & Nguyen, 2022) o las imágenes de alta resolución espectral . Todo ello correlacionado a nuevos métodos o algoritmos de clasificación y tratamiento de las imágenes a través de machine learning o aprendizaje automático (Ferreira et al., 2022),

random forest (bosque aleatorio/árboles de decisión) y el análisis basado en objetos. Estos términos están muy correlacionados a otros como el Deep learning (aprendizaje profundo), el cual es un concepto cercano al de machine learning, donde este último trabaja con algoritmos de regresión o con árboles de decisión, y el Deep learning que utiliza redes neuronales que funcionan de forma parecida a las conexiones biológicas de nuestro cerebro (Y. Bai et al., 2021).

La mayor limitación de nuestro estudio es el uso de una única base de datos Web of Science para la recopilación de datos. La consecuencia es que es posible que no proporcione acceso a todas las publicaciones en todas las fuentes o revistas científicas. Puede haber algunos artículos relevantes que no se incluyeron en la colección de publicaciones. Ampliar el estudio a otras bases de datos bibliográficas en línea (Scopus Dimensions, entre otros) reduciría la omisión en el análisis. Por otro lado, aunque se utilizó el software VOSviewer para el análisis, esta herramienta presenta algunas restricciones funcionales. Una combinación mayor con otras herramientas gratuitas de análisis bibliométrico (BibExcel, SciMAT y Bibliometrix por ejemplo) permitiría un análisis más profundo aprovechando cada herramienta de análisis individual.

1.7 CONCLUSIONES

La Teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para conocer y explorar las características de la dinámica que se establece entre la vegetación y su entorno físico. En este trabajo el análisis reveló que, de las 842 publicaciones utilizadas, la fuente más citada fue International Journal of Remote Sensing (con un factor de impacto 2.5), seguido de Remote Sensing of Environment (con un factor de impacto 8.2). Los documentos con el mayor número de citas correspondieron a los artículos “NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space” (Gao 1996) y “Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS” (Gitelson et al. 1996); los dos publicados en Remote Sensing of Environment. De igual forma, el análisis arrojó que el autor más citado es Gao, Bo-Cai. En cuanto al el análisis de citas conjuntas y de análisis de co-ocurrencia de palabras

claves para explorar el estado del arte de la investigación en la temática, se distinguieron cuatro especialidades coherentes e integradas, asociadas a los diferentes documentos:

- El uso de las combinaciones lineales del rojo e infrarrojo fotográfico para monitorear la vegetación
- Evaluación de la precisión de las clasificaciones de datos de Teledetección
- Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)
- Rendimiento radiométrico y biofísico de los índices de vegetación MODIS

A través de este análisis se captaron los temas emergentes donde se identificaron ocho grandes focos temáticos: 1) La Teledetección en el monitoreo de la dinámica de la vegetación; 2) NDVI en el estudio del cambio climático; 3) Teledetección hiperespectral; 4) Nuevas plataformas de Teledetección para el monitoreo de la vegetación; 5) Teledetección en ecosistemas árticos y detección del cambio; 6) Teledetección en zonas secas y aprendizaje automático; 7) Teledetección multitemporal en zonas húmedas e imágenes de radar; 8) Teledetección en ecosistemas acuáticos y el análisis basado en objetos.

De acuerdo con los resultados, este enfoque metodológico ayudó a revelar detalles de la base teórica del objeto de estudio y captar las temáticas emergentes que se están produciendo en este campo. La combinación de estos dos procedimientos de análisis podría aplicarse en el futuro para la revisión de la literatura sobre otros temas.

CAPÍTULO II. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) EN TRES MUNICIPIOS DEL ALTIPLANO POTOSINO

2.1 RESUMEN

La región que ocupan los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villas de Ramos en el Estado de San Luis Potosí, México, presenta una vegetación desértica (matorrales) con áreas dedicadas a la agricultura. Esta investigación utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) para describir la variabilidad espacio-temporal de la cubierta vegetal. Los datos analizados del NDVI se obtuvieron de imágenes Landsat, se construyó una serie de tiempo que cubrió el periodo de 1993 al 2021 y se utilizaron el coeficiente de variación y el análisis de tendencia de la prueba de Mann-Kendall como métodos de análisis. La distribución espacial del NDVI fluctuó entre -0.17 a 0.57, donde los valores más altos se presentaron en las zonas agrícolas y los valores intermedios en los matorrales. Las variaciones temporales del NDVI fluctuaron de 0.18 a 0.22, con los valores más altos en 2015, mientras que los más bajos se observaron en 2017. Los métodos de análisis de series de tiempo de imágenes de satélites a través de técnicas de Teledetección sugieren que las coberturas vegetales del área presentan una tendencia al cambio de uso derivado de las actividades humanas.

Palabras clave: Landsat; Variabilidad cobertura vegetal, Series de tiempo, Análisis de tendencia

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF THE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI) IN THREE ALTIPLANO POTOSINO MUNICIPALITIES

2.2 ABSTRACT

The region occupied by the municipalities of Salinas, Santo Domingo and Villas de Ramos in the State of San Luis Potosí, Mexico, presents a desert vegetation (scrubs) with areas dedicated to agriculture. This research used the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to describe the spatiotemporal variability of vegetation cover. The NDVI data analyzed were obtained from Landsat images, a time series covering the period from 1993 to 2021 was constructed, and the coefficient of variation and trend analysis of the Mann-Kendall test were used as analysis methods. The spatial distribution of the NDVI fluctuated between -0.17 to 0.57, where the highest values occurred in agricultural areas and intermediate values in scrublands. The temporal variations of the NDVI fluctuated from 0.18 to 0.22, with the highest values in 2015, while the lowest were observed in 2017. The methods of analysis of time series of satellite images through Remote Sensing techniques suggest that the Vegetation coverage of the area presents a tendency to change in use derived from human activities.

Key words: Landsat; Vegetation cover variability, Time series, Trend analysis

2.3 INTRODUCCIÓN

El seguimiento de los procesos ecológicos es esencial para comprender y proteger los entornos naturales y preservar la biodiversidad (Willis, 2015). La cubierta vegetal, caracterizada por la fisonomía de la vegetación es una expresión de la influencia de factores ambientales, por lo que su caracterización y clasificación es importante para identificar unidades del paisaje que son objeto de intervención. En este sentido, la vegetación es un atributo observable del paisaje terrestre, que a simple vista en el terreno o a través de medios de percepción a distancia, permite caracterizar un conjunto de condiciones ecológicas diversas (Jardel-Peláez, 2015; Peng et al., 2012).

El estado de la vegetación se usa comúnmente en las evaluaciones de la productividad de las tierras naturales y agrícolas y se considera que una tendencia decreciente o de pardeamiento indica degradación de la tierra (Jong et al., 2011). Es conocido que la vegetación se caracteriza por presentar variaciones interanuales y estacionales, dichas variaciones en la cobertura vegetal superficial afectan en muchos de los casos el equilibrio de los ecosistemas regionales, los estudios sobre la variación en la cobertura vegetal son base para los procesos de protección del medio ambiente ecológico (Jiang et al., 2015). Sin embargo, es difícil establecer una situación de causa y efecto a las tendencias de la vegetación, porque las variaciones en su productividad están impulsadas por diversos factores (como la temperatura y la precipitación), incluidos los ciclos climáticos y las prácticas de manejo (Jong et al., 2011; Pang et al., 2017).

Evaluar cómo los cambios ambientales afectan la distribución y la dinámica de las poblaciones de vegetación y animales, es cada vez más importante para permitir mejores predicciones de los efectos, por ejemplo, del calentamiento global, la reducción de la biodiversidad o la degradación del hábitat. (Pettorelli et al., 2005). La detección de cambios es el proceso de identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno al observarlo en diferentes momentos. Esencialmente, implica la capacidad de cuantificar los efectos del tiempo, mediante el uso de conjuntos de datos multitemporales (Singh, 1989)

La vegetación opera en una amplia gama de escalas temporales y espaciales como consecuencia de sus procesos intrínsecos y través de los servicios ecosistémicos directos e indirectos que presta, por tanto, la importancia de comprender el estado y función de la vegetación, junto con su dinámica ha llevado al desarrollo de una amplia gama de técnicas de observación o modelado. De estos, la Teledetección se ha convertido en una parte central de los esfuerzos para abordar muchos de estos problemas inherentes, debido a las grandes escalas espacio-temporales que se pueden cubrir, a su capacidad de síntesis e intervención no invasiva. (Disney, 2016). En este sentido, los índices de vegetación derivados de las imágenes de satélite, son ampliamente utilizados como parámetros de la dinámica de la vegetación y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ha sido el indicador más utilizado para representar el estado de la vegetación (Pang et al., 2017; Peng et al., 2012).

De igual manera, el desarrollo y la consolidación a nivel global de los datos de Teledetección ha proporcionado nuevos conocimientos en el campo del mapeo de las coberturas terrestres a gran escala (Sudmanns et al., 2020; Wulder et al., 2016), o de manera específica en el mapeo y/o monitoreo de la vegetación. Por tanto, hoy en día se habla de temáticas como: plataformas de computación en la nube (Amani et al., 2020; Gorelick et al., 2017), enfoques de procesamiento basados en series temporales (Gómez et al., 2016; Kuenzer et al., 2015) e inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje profundo y otros términos relacionados (Yamashkin et al., 2020; Yuan et al., 2020). En tal sentido, plataformas de computación en la nube como Google Earth Engine (GEE) y Framework for Operational Radiometric Correction for Environmental Monitoring (FORCE) brindan un alto poder de cómputo y accesibilidad a series temporales densas (Frantz, 2019; Gorelick et al., 2017; Tassi & Vizzari, 2020).

La mayoría de los análisis a través de imágenes satelitales, como Landsat, requieren que los datos sean consistentes y precisos, la coherencia garantiza que los cambios medidos, se deban a cambios en la superficie de la Tierra y no a cambios del sensor (ya sea la respuesta radiométrica o la ubicación geométrica). En este sentido, se deberá llevar a cabo un preprocesamiento antes del análisis, para minimizar los efectos de los sensores de origen solar, atmosféricos y topográficos. Sin embargo, esta tarea es un

proceso difícil y lento, que puede conducir a resultados erróneos, principalmente cuando se trabaja con series temporales (Young et al., 2017).

En la actualidad varios países, incluido México, han empezado a tener iniciativas para la implementación de los llamados Cubos de Datos Geográficos, los cuales son una solución basada en código abierto para acceder, administrar y analizar grandes cantidades de datos para sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), es decir, datos de observación de la Tierra como las imágenes satelitales Landsat o Sentinel. Algunas de sus ventajas son: que brindan un marco de trabajo flexible, el usuario mantiene el control y la propiedad de sus datos; el cambio de paradigma del análisis basado en escenas y una menor barrera de entrada para el análisis de datos de Teledetección. (INEGI, 2020; Roberts et al., 2017; Roberts et al., 2018).

En tal sentido, se han desarrollado métodos para analizar series de tiempo y detectar tendencias, con miras a identificar cambios e incluso separar los diferentes tipos de cambios. (Eckert et al., 2015). Por ejemplo, se introdujo un procedimiento para analizar las tendencias estacionales, en series temporales de datos ambientales, derivados de la Teledetección. Esta técnica, denominada Análisis de Tendencia Estacional (STA, por sus siglas en inglés), demostró ser robusta a la variabilidad interanual de corto plazo (Eastman et al., 2009). En la cuenca del río Amarillo en China, se lleva a cabo un análisis de las variaciones y los patrones de la cobertura vegetal para ello, se utilizan los métodos de análisis de tendencia como la mediana de Theil-Sen, la prueba de Mann-Kendall y el método del índice de Hurst (Jiang et al., 2015). En la misma línea de investigación, se llevó a cabo en la meseta tibetana una evaluación de las tendencias de la vegetación para comprender los efectos de los cambios recientes en el clima y el uso de la tierra (Fassnacht et al., 2019). También se investiga, por ejemplo, la influencia de parámetros meteorológicos en la respuesta del NDVI, como la precipitación, la radiación neta y la temperatura del aire (que representan las condiciones energéticas), concluyendo que el agua o la precipitación es clave para el control del crecimiento de la vegetación. (Zhang et al., 2018). Por último, en Canadá se investiga las tendencias espacio-temporales en los procesos de recuperación forestal posterior a una perturbación (por ejemplo, los incendios) utilizando series temporales Landsat del 1985-2017 basados en un índice de

calcinación normalizado (NBR, por sus siglas en inglés) para relacionar la cantidad de años necesarios para que un píxel vuelva al 80% de su NBR anterior al valor de la perturbación (White et al., 2022)

Para el caso de México, se han llevado a cabo algunas investigaciones, por ejemplo, se hizo un análisis del comportamiento promedio y la tendencia sostenida del NDVI por píxel en la región meridional de la península de Baja California durante el período 2001-2015, el análisis reveló que los valores de tendencia del NDVI negativos indican una pérdida del vigor de la vegetación (Salinas-Zavala et al., 2017). En la misma zona, se llevó a cabo un análisis espacio-temporal del NDVI para los diferentes tipos de vegetación durante la temporada de crecimiento, donde los resultados sugirieron que un índice de vegetación con alta resolución espacial (30 m) derivado de imágenes Landsat 7 podría usarse para describir la variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal por tipo en el área de estudio, concluyendo que este método puede utilizarse para definir programas específicos de conservación y gestión (Maldonado-Enríquez et al., 2020).

En este estudio se pretende analizar, no solamente el comportamiento promedio temporal y espacial del NDVI, sino también observar su tendencia que, si bien es un método simple, es un concepto importante en el estudio de las coberturas vegetales a través de series temporales, pues permite observar en un sentido general los patrones de comportamiento de dicho índice en un entorno particular y período de tiempo determinado, para su adecuada caracterización y clasificación. Por tanto, el objetivo de este estudio fue identificar tendencias o patrones a través del análisis espacio temporal del NDVI de series de tiempo de imágenes satelitales Landsat, en los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos en el Estado de San Luis Potosí.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Localización de la zona de estudio

Esta se encuentra ubicada en la porción Centro-Norte de México, específicamente al noroeste del estado de San Luis Potosí entre las coordenadas extremas de $-101^{\circ} 20' 25''$ y $23^{\circ} 47' 50''$ del punto superior, $-101^{\circ} 47' 00''$ y $22^{\circ} 27' 54''$ del punto inferior, $-101^{\circ} 13' 39''$ y $23^{\circ} 21' 32''$ del punto izquierdo y $-102^{\circ} 17' 45''$ y $23^{\circ} 19' 14''$ del punto derecho (Figura 1). Dicha área cubre una superficie de $8,544.7 \text{ km}^2$ que pertenece a los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos.

La región fisiográfica denominada Mesa del Centro, específicamente la subprovincia Llanuras y Sierras Potosina-Zacatecanas cubre la mayor parte del territorio del área, por lo que se caracteriza por ser una región elevada con terrenos áridos constituida por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, cubiertas en su mayor parte por rocas de origen volcánico del cenozoico (CONAGUA, 2020; INEGI, 2002).

El clima predominante es semiárido templado (BS1kw), con temperaturas medias anuales de entre 12°C a 18°C . El régimen de lluvias que se presenta en toda el área es el de verano con valores promedio de precipitación media anual de entre 300 mm a 400 mm (INEGI, 2005, 2008). Estas condiciones climáticas se caracterizan por ser seco extremo, con invierno frío, reflejándose sus efectos en la vegetación. De acuerdo con el conjunto de datos de uso del suelo y vegetación serie VII del INEGI (2018) casi el 62% del área (5281.86 km^2) está cubierta por un tipo de vegetación semidesértica principalmente con matorrales del tipo desértico micrófilo y en menor proporción del tipo rosetófilo y crasicale.

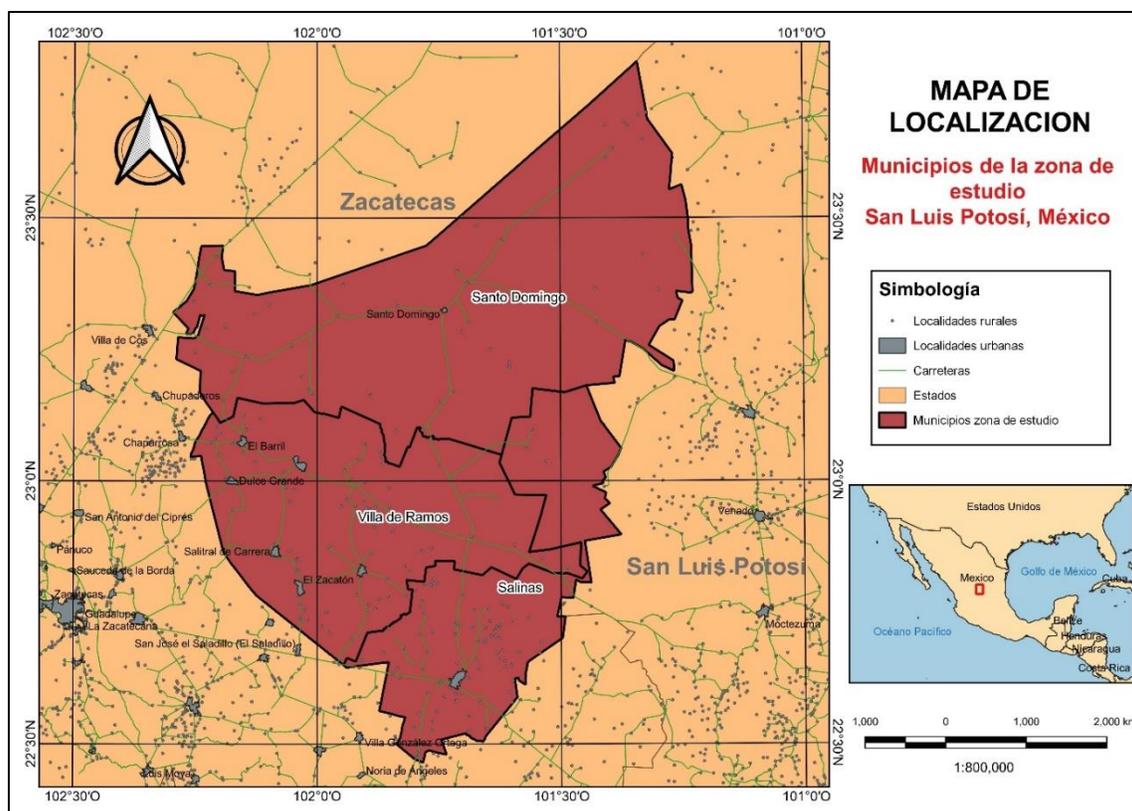


Figura 6. Mapa de localización de los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

Los escurrimientos son intermitentes solo presentes al existir precipitaciones que al fluir han permitido la formación de pequeñas lagunas (como las de la Mesilla, Santa Rosa y Salinas) o cuerpos de agua intermitentes de poca profundidad que junto a la alta evaporación favorecen la formación de depósitos de sales (CONAGUA, 2020).

Otros tipos de vegetación presentes en la zona y muy relacionada a las condiciones ecológicas, es la vegetación halófila xerófila, que se caracteriza por desarrollarse sobre suelos con alto contenido de sales que permiten el desarrollo de especies de baja altura por la dominancia de pastos rizomatosos y tallos rígidos, además de una escasa cobertura de especies arbustivas (INEGI, 2016).

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020 dados a conocer por el INEGI (2021), la zona tiene una población total de 80,281 habitantes, que se distribuye en 217 localidades de las cuales 210 se clasifican como rurales, las urbanas

son 7 localidades: la Cabecera Municipal Salinas, Dulce Grande, El Zacatón, El Barril, Salitral de Carrera, Hernández y la Cabecera Municipal Villa de Ramos. La actividad agrícola es una de las principales desde el punto de vista económico en la zona. De acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para 2020 se reportaron un total de 1582.12 km² para uso agrícola, de las cuales 234.77 km² (14.84%) son de riego y 1347.35 km² (85.16%) de temporal. El cultivo del chile es el de mayor rentabilidad económica y es el principal generador de ingresos. Por otra parte, el frijol es el cultivo característico de la región y el de mayor importancia social ya que se lleva a cabo en condiciones tanto de riego como temporal, otros tipos de cultivos característicos presentes son la avena y el maíz.

2.4.2. Base de datos y preprocesamiento de imágenes satelitales

Para el presente estudio se integró una base de datos de 120 compuestos basados en imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8 (5,000 X 5,000 píxeles en formato TIFF) que cubre un período de tiempo de 29 años (1993 a 2021) basados en la geomédiana, la cual es un enfoque a nivel píxel que toma una colección de observaciones de la Tierra y las colapsa en una sola imagen. Esta mantiene las relaciones espectrales entre las bandas, proporcionando una buena representación de una observación típica que carece de valores atípicos y con ruido espacial reducido (INEGI, 2020).

La zona de estudio es cubierta totalmente por la extensión o cobertura de las cuadrículas MX-014008, MX-014009, MX-015008 y MX-015009, dichos compuestos contienen 6 bandas del espectro electromagnético (azul, verde, roja, infrarrojo cercano, SWIFT1 y SWIFT2).

La geomédiana, es una generalización de la mediana llamada, mediana geométrica, también conocida como la mediana L1, la mediana centro o la mediana espacial; la cual es una alternativa para la composición de series de tiempo de imágenes satelitales. Este estadístico es particularmente útil, ya que permite un tratamiento estadístico preservando las relaciones entre las bandas espectrales. Dado un conjunto X que corresponde a una serie temporal asociada a un píxel de p -bandas como vectores $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ es

menor o igual a R^p , la mediana geométrica de estas observaciones es (INEGI, 2020; Roberts et al., 2017):

$$\hat{\mu} = \operatorname{argmin} \left\{ x \in R^p \left| \sum_{i=1}^n \|X - X_i\| \right. \right\}$$

Es decir, la geomédiana es un punto en el espacio multidimensional que minimiza la suma de las distancias al conjunto de observaciones. Como se puede apreciar, el espacio de búsqueda para la obtención de la geomédiana es infinito, por lo que un método de búsqueda exhaustivo no es viable.

```

X = {x1, x2, ..., xn} ⊂ ℝp
ε = 10-7
maxiter = 1000
y0 =  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 
while k < maxiter do
    |
    |  $y_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\|x_i - y_k\|}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|x_i - y_k\|}}$ 
    |
    | if  $\|y_{k+1} - y_k\| / \sqrt{p} < \epsilon$  then
    | | break
    | end
    | k ← k + 1
end

```

Figura 7. Algoritmo para la obtención de la geomédiana a partir de imágenes satelitales ópticas.

Posterior a la integración de los compuestos, estos se unieron en un solo mosaico correspondiente a cada uno de los años que componen la serie temporal, de tal forma que se integraron 29 compuestos anuales. Adicionalmente, se llevó a cabo su recorte de dichos compuestos anuales a la extensión que cubre el área de estudio.

Se generó el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI que ha demostrado mejorar el proceso de clasificación de coberturas vegetales en estudios previos; (Dutra et al., 2020; Orynbaikyzy et al., 2019).

El NDVI utiliza la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Según esta fórmula, el valor del NDVI en un punto determinado de la imagen, es igual a la diferencia en las intensidades de la luz reflejada en el rango rojo (RED o Espectroscopía de Reflectancia de la parte Roja Visible) e infrarrojo (NIR o Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano) dividido por la suma de estas intensidades (Tucker, 1979). Para construir las imágenes NDVI anuales para el área de estudio usando los compuestos basados en imágenes Landsat se utilizó el software de sistema de información geográfica QGIS en su versión 3.16 Hannover (QGIS Development Team, 2020).

La distribución espacial de la vegetación por tipo, se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000 Serie VII (INEGI, 2018). Este mapa se recortó al área de estudio y se fusionaron tipos similares de cobertura terrestre en una categoría, obteniéndose grupos generales. Esta información se utilizó para obtener datos de distribución por tipo de cobertura terrestre de los valores promedio del NDVI y de los derivados a partir del análisis estadístico.

2.4.3. Análisis estadístico

El coeficiente de variación y el método de exponente de Mann-Kendall se utilizaron para estudiar las regiones cubiertas de vegetación del área de estudio, es decir, la distribución espacial, las características de variación temporal, la volatilidad y la variación en las tendencias. Para llevar a cabo dichos análisis se implementaron ejecutables con el programa estadístico R, utilizando los paquetes Kendall (McLeod, 2015), Raster (Hijmans et al., 2015) y la función MKraster (Abdi et al., 2019).

Coeficiente de variación. Este tipo de análisis se usa en estudios sobre la vegetación principalmente para reflejar el grado discreto de los datos NDVI y la variación o volatilidad interanual/anual de la vegetación (Jiang et al., 2015; Milich & Weiss, 2000; C. J. Tucker et al., 1991), su cálculo se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$CV_{NDVI} = \frac{\sigma_{NDVI}}{\overline{NDVI}}$$

donde, CV_{NDVI} se refiere al coeficiente de variación del valor NDVI de cada píxel en el período de estudio; σ_{NDVI} representa la desviación estándar del valor del índice de vegetación; \overline{NDVI} es el valor medio. Un CV_{NDVI} más grande significa que la serie temporal de NDVI muestra una mayor fluctuación en los datos, mientras que un CV_{NDVI} más pequeño denota una serie temporal de NDVI más estable.

Test Mann-Kendall. La prueba de Mann-Kendall mide la significancia de una tendencia. Es una prueba estadística no paramétrica y tiene la ventaja de que las muestras no necesitan obedecer ciertas distribuciones y está libre de la interferencia de valores atípicos (Tošić, 2004). Ha sido ampliamente aplicado para analizar las tendencias y variaciones en sitios con series temporales hidrológicas y meteorológicas. Recientemente, esta prueba se ha utilizado para estudiar las variaciones de la vegetación (Fensholt & Proud, 2012).

Mediante esta prueba se busca evaluar estadísticamente, conjuntos de datos que no tienen un comportamiento paramétrico y permite observar si hay una tendencia positiva o negativa de la variable a estudiar en el tiempo. Una tendencia positiva significa que la variable aumenta a través del tiempo, aunque puede ser o no ser lineal. Por el contrario, una tendencia negativa significa que disminuye a lo largo del tiempo. Los valores neutros, que ni aumentan ni disminuyen, no son estadísticamente significativos. De acuerdo con los valores obtenidos, se establecieron 3 categorías de tendencia de NDVI; aquellos valores menores a los -0.25 se incluyeron dentro del grupo de tendencia negativa, los valores que estuvieran dentro del rango -0.25 a 0.5 se incluyeron en el grupo con una tendencia neutra y aquellos valores mayores a los 0.5 se incluyeron en el grupo con una tendencia positiva. Luego, se calculó el área de tendencia en función de las categorías establecidas.

2.5 RESULTADOS

2.5.1. Características de la distribución espacial del NDVI

En este apartado se presenta el análisis de la variable NDVI en forma de serie de tiempo para el territorio que abarca el entorno de los tres municipios estudiados. Este tipo de análisis revela ciertos cambios naturales experimentados por la vegetación a lo largo de un determinado tiempo. Para fines de seguimiento, será necesario distinguir las fluctuaciones en el verdor que resultan de oscilaciones naturales de otros procesos. Es necesario mencionar que existe la influencia de las anomalías climáticas que repercuten en el vigor del crecimiento. Tal es el caso de los años considerados como húmedos que determinan en gran medida el incremento del valor del NDVI, mientras que los años secos, generan valores bajos del indicador de cambio (Erasmí et al., 2009).

En la Figura 8 se muestra la distribución espacial del NDVI obtenida a partir de los valores promedio para un lapso de 29 años, período comprendido de 1993 a 2021. Dicha distribución en toda el área de estudio para el período evaluado varió entre -0.17 a 0.57. La región se caracteriza por presentar principalmente los valores más altos en las zonas agrícolas del municipio de Villa de Ramos, aunque en menor proporción, se presentan valores similares en puntos cercanos a la localidad de Salinas, en el municipio del mismo nombre, así como en las lagunas de Azogueros y Santa María de Peñón Blanco. También se observa una similitud de estos valores en los cauces de los escurrimientos intermitentes presentes en toda el área de estudio.

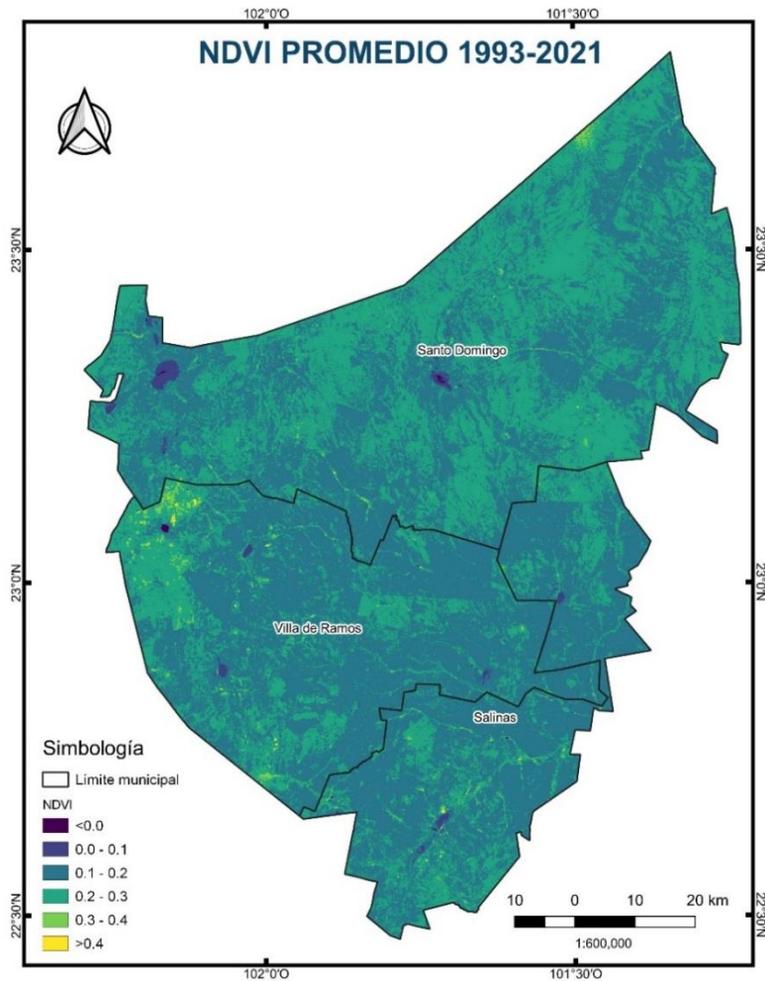


Figura 8. Distribución espacial de los valores promedio del NDVI 1993-2021.

Con el conjunto de datos de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI (2018) se obtuvieron ocho coberturas terrestres, de las cuales tres son comunidades vegetales (matorral (MAT) que representa casi el 62% del área de estudio, el 26% a las zonas agrícolas de riego (AGR) y temporal (AGT), el 8% del área es cubierto por vegetación secundaria arbustiva (VSA) y los pastizales (PAS) cubren un área cercana al 3%, el restante 1% es ocupado por otro tipos de coberturas como las zonas urbanas (ZUB), cuerpos de agua (H2O) y áreas desprovista de vegetación (ADV).

Cuadro 7. Porcentaje de distribución de los valores promedio del NDVI en las diferentes coberturas terrestres.

| NDVI | ADV | AGR | AGT | H2O | MAT | PAS | VSA | ZUB | Total |
|-----------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------------|
| SALINAS | | | | | | | | | |
| < 0 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.003 | 0.001 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.011 |
| 0.0 - 0.1 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.076 | 0.015 | 0.373 | 0.003 | 0.027 | 0.503 |
| 0.1 - 0.2 | 0.000 | 0.122 | 17.229 | 0.058 | 48.375 | 2.761 | 1.632 | 0.354 | 70.532 |
| 0.2 - 0.3 | 0.000 | 0.081 | 5.258 | 0.087 | 20.817 | 0.797 | 0.862 | 0.173 | 28.076 |
| 0.3 - 0.4 | 0.000 | 0.026 | 0.207 | 0.002 | 0.479 | 0.030 | 0.064 | 0.020 | 0.827 |
| > 0.4 | 0.000 | 0.015 | 0.019 | 0.000 | 0.012 | 0.003 | 0.001 | 0.002 | 0.051 |
| SANTO DOMINGO | | | | | | | | | |
| < 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.028 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.030 |
| 0.0 - 0.1 | 0.000 | 0.002 | 0.011 | 0.356 | 0.061 | 0.174 | 0.026 | 0.002 | 0.631 |
| 0.1 - 0.2 | 0.000 | 0.696 | 9.874 | 0.075 | 29.985 | 1.992 | 4.017 | 0.097 | 46.736 |
| 0.2 - 0.3 | 0.000 | 0.490 | 4.358 | 0.039 | 38.097 | 1.177 | 7.875 | 0.058 | 52.094 |
| 0.3 - 0.4 | 0.000 | 0.024 | 0.099 | 0.002 | 0.283 | 0.001 | 0.088 | 0.000 | 0.498 |
| > 0.4 | 0.000 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.009 |
| VILLA DE RAMOS | | | | | | | | | |
| < 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.048 | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.054 |
| 0.0 - 0.1 | 0.033 | 0.001 | 0.008 | 0.196 | 0.048 | 0.028 | 0.002 | 0.014 | 0.330 |
| 0.1 - 0.2 | 0.023 | 2.386 | 28.458 | 0.208 | 30.603 | 1.038 | 3.970 | 0.382 | 67.069 |
| 0.2 - 0.3 | 0.004 | 5.650 | 8.469 | 0.109 | 13.874 | 0.232 | 2.384 | 0.247 | 30.969 |
| 0.3 - 0.4 | 0.000 | 0.772 | 0.346 | 0.003 | 0.302 | 0.005 | 0.038 | 0.014 | 1.479 |
| > 0.4 | 0.000 | 0.070 | 0.023 | 0.000 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.100 |

NDVI: Rango de valores del índice de vegetación de diferencia normalizada, ADV: Área desprovista de vegetación, AGR: Agricultura de riego, AGT: Agricultura de temporal, H2O: Agua o cuerpos de agua, MAT: Matorral, PAS: Pastizal, VSA: Vegetación secundaria arbustiva y ZUB: Zona urbana.

El Cuadro 7 presenta la distribución del porcentaje de los valores promedio del NDVI en los diferentes tipos de coberturas terrestres por cada uno de los municipios, de tal forma que la mayor proporción o porcentaje de valores promedio se dan en el rango 0.1 a 0.2 en dos de los municipios estudiados (Salinas, Villa de Ramos), le sigue el siguiente rango de 0.2 a 0.3 y en menor proporción el siguiente que va de 0.3 a 0.4. Cabe resaltar también que estos mismos valores promedios del NDVI se concentraron principalmente en la cobertura de matorrales donde se observa en el mismo Cuadro que para el caso del municipio de Salinas casi el 70% de los valores promedio NDVI se dan en los rangos de 0.1 a 0.4, del mismo modo para el municipio de Santo Domingo con una proporción de alrededor del 68% y para el municipio de Villa de Ramos con una menor proporción que alcanzó casi el 45% de su territorio. Esta concentración de los valores promedio también se presenta en las zonas con agricultura de temporal teniendo para el caso de Salinas casi un 23%, un 14% para el caso del municipio de Santo Domingo y un 37% para el de

Villa de Ramos. Para la cobertura clasificada como agricultura de riego destaca el municipio de Villa de Ramos con casi el 9% de los valores promedio del NDVI en los mismos rangos. Por último, destaca también la cobertura clasificada como vegetación secundaria arbustiva donde en el municipio de Salinas se distribuyen en los rangos ya mencionados casi los 2.6%, para los municipios de Santo Domingo y Villa de Ramos una proporción de casi el 12% y del 6.4% respectivamente.

En general, la región estudiada tiene una especial connotación ecológica, por su condición seca y semiárida, donde la comunidad vegetal predominante que allí se desarrolla, son matorrales (micrófilo y rosetófilo), pastizales y actividades agrícolas de temporal y riego. Esta comunidad vegetal está regulada por una cantidad de factores y procesos, entre los cuales la estacionalidad en la disponibilidad de agua en el suelo figura como uno de los condicionantes principales.

Bajo este contexto, el comportamiento del NDVI es propio de las zonas secas y semidesérticas, de esta forma se observa que en la comunidad vegetal predominante de matorrales (micrófilo y rosetófilo), los valores de NDVI intermedios que se distribuyen al norte del área de estudio (Santo Domingo), en la zona centro del municipio de Villa de Ramos y en las zonas sur, centro y norte del municipio de Salinas, oscilan principalmente entre 0.2 y 0.3. De manera similar, se presentan estos mismos valores intermedios de NDVI en los territorios ocupados principalmente por agricultura de temporal y riego, los cuales ocupan principalmente la región sur y noroeste del municipio de Villa de Ramos.

En relación con la comunidad vegetal de los pastizales que crece de forma muy importante entre los matorrales, se presentan valores NDVI que oscilan entre 0.1 y 0.2. Estos valores se distribuyen en la parte norte y sur del municipio de Santo Domingo, áreas que colindan con el territorio de Villa de Ramos, que en su región centro, oriente y sur presentan el mismo comportamiento del NDVI (0.1 a 0.2), al igual que la zona norte de Salinas, que colinda con el municipio de Villa de Ramos.

2.5.2. Características de la distribución temporal del NDVI

La distribución temporal del NDVI promedio para el período de estudio, se muestran en el Cuadro 8 y en la Figura 9, éste fluctuó en toda la serie temporal a partir del valor absoluto mínimo de -0.19 para el año 1993 hasta 0.87 en el 2015, cuyo rango de variación fue de 0.68 en la serie temporal. Para el caso del valor promedio del NDVI éste fluctuó a partir del valor mínimo de 0.14 para el año 2001 a 0.28 en el 2015 y su rango de variación fue de 0.14. Para los valores mínimos del NDVI estos fluctuaron de -0.19 para el año 1993 a -0.67 en el 2012, con un rango de variación que fue de 0.48. En relación con los valores máximos, estos oscilaron de 0.72 en el año 1999 a 0.87 en el 2015 y su rango de variación fue de 0.15. Cabe destacar que los valores anteriores se presentaron para el caso de los valores mínimos entre los años 1999 y 2001 principalmente, mientras que para los valores máximos se presentaron entre los años 2014 y 2015.

Por otro lado, es importante resaltar que las mayores variaciones del NDVI, se presentaron en el año 2012, los cuales cubrieron un período aproximado de tres años (a partir del 2010); caso contrario, el año con menor variación, se presentó en el 2000, que cubrió un período igual de tres años (1999 a 2001).

El análisis de regresión entre los valores promedios de NDVI de los tres municipios estudiados y los años comprendidos en la serie temporal ($R^2 = 0.377$), indica una relación positiva entre las dos variables. Se observa que el comportamiento de los años (condición climática) se refleja en el comportamiento temporal del NDVI. Es decir, los años con ocurrencia y períodos prolongados de sequía, se relacionan con los valores mínimos de NDVI, como se puede observar en los años: 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2006 y 2011, respectivamente, mientras que los años húmedos, se relacionan con los valores máximos de NDVI, como lo muestra el año 2015 que presenta el pico más alto, lo cual, se puede observar que a partir de ese año, se incrementó la actividad fotosintética de las diversas coberturas (matorrales, pastizales y actividad agrícola), aunque en los años subsiguientes, sus valores fueron más bajos que 2015 (Figura 9).

Cuadro 8. Distribución de valores estadísticos en la serie temporal del NDVI.

| Año | Mínimo | Promedio | Máximo | Diferencia | Desviación estándar |
|-----------------|--------------|----------|--------|------------|---------------------|
| 1993 | -0.190 | 0.188 | 0.773 | 0.963 | 0.029 |
| 1994 | -0.417 | 0.208 | 0.746 | 1.163 | 0.041 |
| 1995 | -0.407 | 0.193 | 0.770 | 1.177 | 0.036 |
| 1996 | -0.347 | 0.183 | 0.749 | 1.097 | 0.029 |
| 1997 | -0.314 | 0.194 | 0.758 | 1.072 | 0.036 |
| 1998 | -0.326 | 0.156 | 0.736 | 1.062 | 0.026 |
| 1999 | -0.247 | 0.149 | 0.717 | 0.964 | 0.026 |
| 2000 | -0.205 | 0.145 | 0.738 | 0.943 | 0.028 |
| 2001 | -0.212 | 0.145 | 0.769 | 0.981 | 0.030 |
| 2002 | -0.318 | 0.207 | 0.741 | 1.059 | 0.049 |
| 2003 | -0.409 | 0.165 | 0.785 | 1.194 | 0.036 |
| 2004 | -0.512 | 0.206 | 0.787 | 1.299 | 0.045 |
| 2005 | -0.391 | 0.181 | 0.786 | 1.176 | 0.037 |
| 2006 | -0.379 | 0.164 | 0.786 | 1.165 | 0.032 |
| 2007 | -0.285 | 0.186 | 0.799 | 1.084 | 0.038 |
| 2008 | -0.416 | 0.172 | 0.768 | 1.184 | 0.034 |
| 2009 | -0.327 | 0.198 | 0.800 | 1.127 | 0.042 |
| 2010 | -0.591 | 0.195 | 0.816 | 1.408 | 0.039 |
| 2011 | -0.604 | 0.160 | 0.802 | 1.406 | 0.031 |
| 2012 | -0.670 | 0.165 | 0.843 | 1.512 | 0.044 |
| 2013 | -0.491 | 0.212 | 0.843 | 1.334 | 0.051 |
| 2014 | -0.570 | 0.229 | 0.844 | 1.414 | 0.048 |
| 2015 | -0.483 | 0.284 | 0.870 | 1.353 | 0.065 |
| 2016 | -0.585 | 0.235 | 0.840 | 1.425 | 0.045 |
| 2017 | -0.413 | 0.215 | 0.845 | 1.258 | 0.042 |
| 2018 | -0.280 | 0.240 | 0.840 | 1.120 | 0.051 |
| 2019 | -0.325 | 0.242 | 0.858 | 1.183 | 0.053 |
| 2020 | -0.249 | 0.230 | 0.847 | 1.096 | 0.052 |
| 2021 | -0.452 | 0.240 | 0.848 | 1.300 | 0.057 |
| Promedio | -0.394 | 0.196 | 0.797 | 1.190 | 0.040 |
| | Valor mínimo | | | | |
| | Valor máximo | | | | |

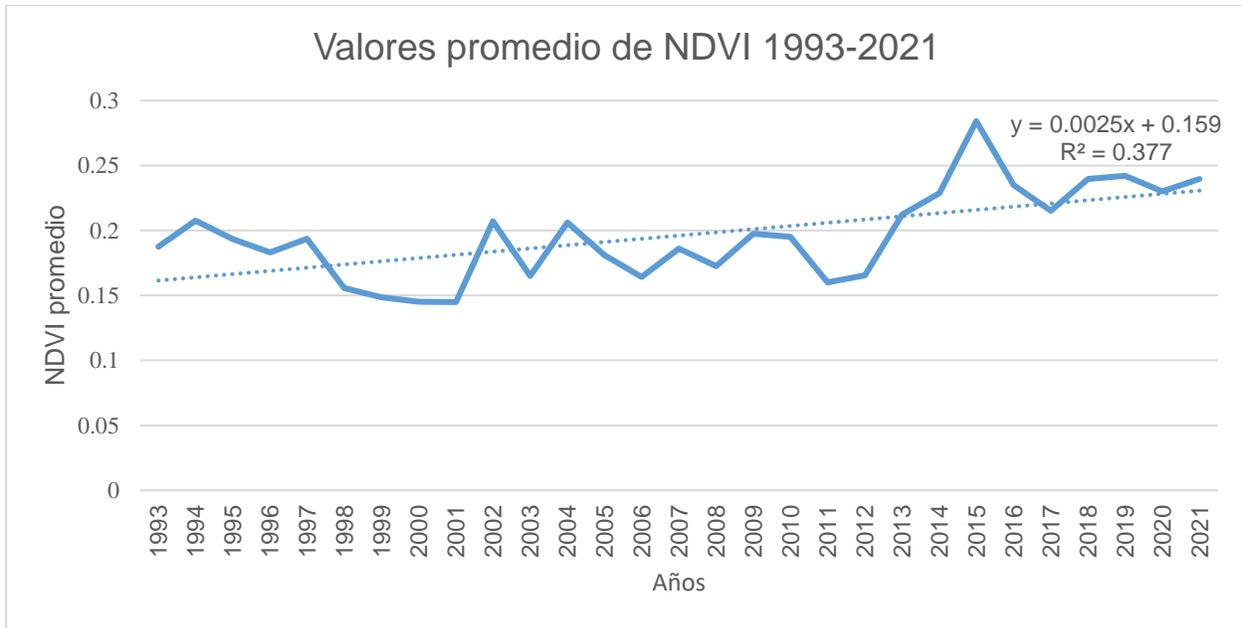


Figura 9. Variación interanual de los valores promedio del NDVI en los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villa de Ramos, San Luis Potosí, México.

2.5.4. Características de la distribución del coeficiente de variación.

La Figura 10 muestra la distribución espacial de los valores del coeficiente de variación (CV) del NDVI para el período de estudio 1993-2021. En esta figura se muestra que los valores de CV en el territorio de los municipios de Salinas, Santo Domingo y Villas de Ramos presentan diferencias significativas, debido al nivel de intervención en el sistema natural (principalmente por las actividades agrícolas), donde se puede distinguir dos zonas muy específicas: la zona oriental, donde se distribuyen principalmente las coberturas de matorrales y la zona occidental donde se distribuyen principalmente los terrenos agrícolas de temporal y riego, así como la vegetación secundaria arbustiva.

Los valores de CV más altos se registraron en las zonas agrícolas principalmente, en aquellas identificadas como de riego y también en las áreas muy cercanas o colindantes a los cuerpos de agua presentes. Los valores medios y bajos se dan en consecuencia principalmente, en aquellas coberturas que presentan una menor intervención como las coberturas con matorrales. El CV se clasificó en cinco categorías: 1) variación muy baja (≤ 0.15), 2) variación baja ($0.15 < CV_{NDVI} \leq 0.20$), 3) variación moderada ($0.20 <$

CVNDVI ≤ 0.25), 4) variación alta ($0.25 < \text{CVNDVI} \leq 0.30$) y 5) mayor variación ($\text{CVNDVI} > 0.30$).

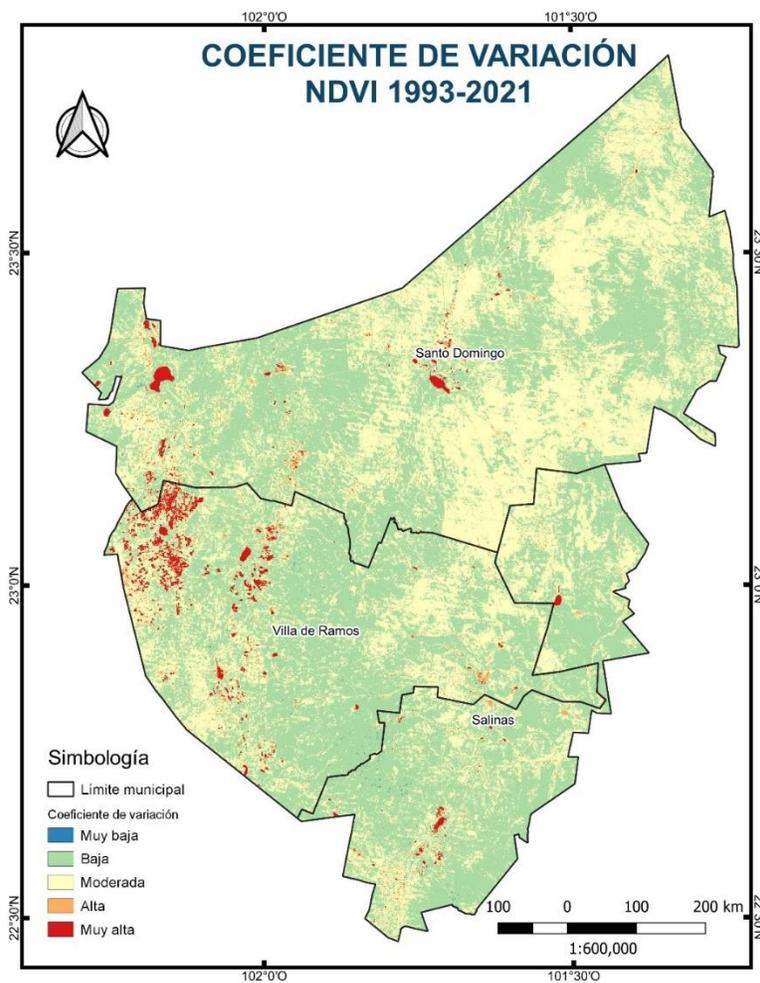


Figura 10. Distribución espacial del Coeficiente de Variación del NDVI.

Cuadro 9. Porcentaje de distribución espacial del coeficiente de variación del NDVI.

| CV | ADV | AGR | AGT | H2O | MAT | PAS | VSA | ZUB | Total |
|-----------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------------|
| SALINAS | | | | | | | | | |
| Muy bajo | 0.000 | 0.000 | 0.069 | 0.000 | 0.011 | 0.017 | 0.001 | 0.004 | 0.102 |
| Bajo | 0.000 | 0.094 | 14.050 | 0.011 | 46.536 | 2.056 | 1.861 | 0.349 | 64.958 |
| Moderado | 0.000 | 0.062 | 7.754 | 0.048 | 22.904 | 1.468 | 0.676 | 0.191 | 33.103 |
| Alto | 0.000 | 0.040 | 0.679 | 0.067 | 0.211 | 0.185 | 0.021 | 0.027 | 1.230 |
| Muy alto | 0.000 | 0.048 | 0.174 | 0.098 | 0.036 | 0.242 | 0.000 | 0.006 | 0.605 |
| SANTO DOMINGO | | | | | | | | | |
| Muy bajo | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.018 |
| Bajo | 0.000 | 0.489 | 6.543 | 0.053 | 32.343 | 1.438 | 8.153 | 0.101 | 49.120 |
| Moderado | 0.000 | 0.478 | 6.894 | 0.056 | 35.845 | 1.796 | 3.771 | 0.054 | 48.894 |
| Alto | 0.000 | 0.105 | 0.750 | 0.016 | 0.163 | 0.031 | 0.057 | 0.003 | 1.124 |
| Muy alto | 0.000 | 0.059 | 0.145 | 0.375 | 0.077 | 0.078 | 0.024 | 0.000 | 0.759 |
| VILLA DE RAMOS | | | | | | | | | |
| Muy bajo | 0.000 | 0.001 | 0.032 | 0.000 | 0.023 | 0.005 | 0.001 | 0.010 | 0.073 |
| Bajo | 0.004 | 2.623 | 22.465 | 0.058 | 28.897 | 0.656 | 3.828 | 0.439 | 58.970 |
| Moderado | 0.007 | 3.732 | 12.459 | 0.118 | 15.701 | 0.561 | 2.536 | 0.179 | 35.293 |
| Alto | 0.002 | 0.936 | 1.202 | 0.132 | 0.177 | 0.050 | 0.023 | 0.018 | 2.540 |
| Muy alto | 0.047 | 1.586 | 1.145 | 0.256 | 0.035 | 0.034 | 0.007 | 0.013 | 3.124 |

CV: Categoría del coeficiente de variación, ADV: Área desprovista de vegetación, AGR: Agricultura de riego, AGT: Agricultura de temporal, H2O: Agua o cuerpos de agua, MAT: Matorral, PAS: Pastizal, VSA: Vegetación secundaria arbustiva y ZUB: Zona urbana.

En el área de estudio, la mayoría de las coberturas ocupadas por los matorrales tienen una variabilidad que tiende de moderada a la más baja y en una pequeña proporción de alta. Este mismo comportamiento lo presenta la vegetación secundaria arbustiva. Para el caso de los pastizales esta variabilidad se extiende en todos los grupos, aunque se concentra en una mayor proporción de baja a moderada. Para las coberturas identificadas de agricultura, ésta presenta el mismo comportamiento de la vegetación natural, es decir, de baja a moderada con cierta proporción de alta y muy alta, principalmente en el municipio de Villa de Ramos. En las áreas con agricultura de riego los valores tienden a ser más homogéneos en su comportamiento, ya que presentan una mayor proporción de moderada a muy alta. Las áreas sin vegetación, se integran en el grupo de más alta variabilidad, aunque su extensión es poco significativa (Cuadro 9).

2.5.4. Comportamiento de la tendencia Mann-Kendall monotónica

Como ya se mencionó anteriormente, la mayor cobertura vegetal lo componen los matorrales, seguida por las áreas agrícolas, luego la vegetación secundaria arbustiva y por último los pastizales. La Figura 11 muestra el coeficiente tau de Mann-Kendall, τ , píxel por píxel, a lo largo de la serie temporal de las imágenes NDVI. La tendencia monotónica de Mann-Kendall, proporciona un indicador de tendencia (tau) que mide el grado en que una tendencia aumenta o disminuye monótonamente, cuyo rango oscila de -1 a 1, esto significa que los valores positivos indican una tendencia creciente mientras que, los valores negativos indican una tendencia decreciente. En la práctica, la estadística de Mann-Kendall mide la diferencia entre la frecuencia relativa de aumentos y la frecuencia relativa de disminuciones. En general, predominan las tendencias neutras del vigor de la vegetación, con algunas zonas representativas con una tendencia positiva.

En la zona de estudio la mayor proporción de áreas presentan una tendencia neutra con 94.3%. De esta el municipio de Santo Domingo alcanzó un 52.1% del total, siguiéndole Villa de Ramos con 28.3% y luego Salinas con 19.6%. Como se puede observar en el Cuadro 10, las coberturas terrestres con mayor proporción de este tipo de tendencia se concentran en la agricultura de temporal y en los matorrales; y en menor proporción en la agricultura de riego, principalmente en el municipio de Villa de Ramos.

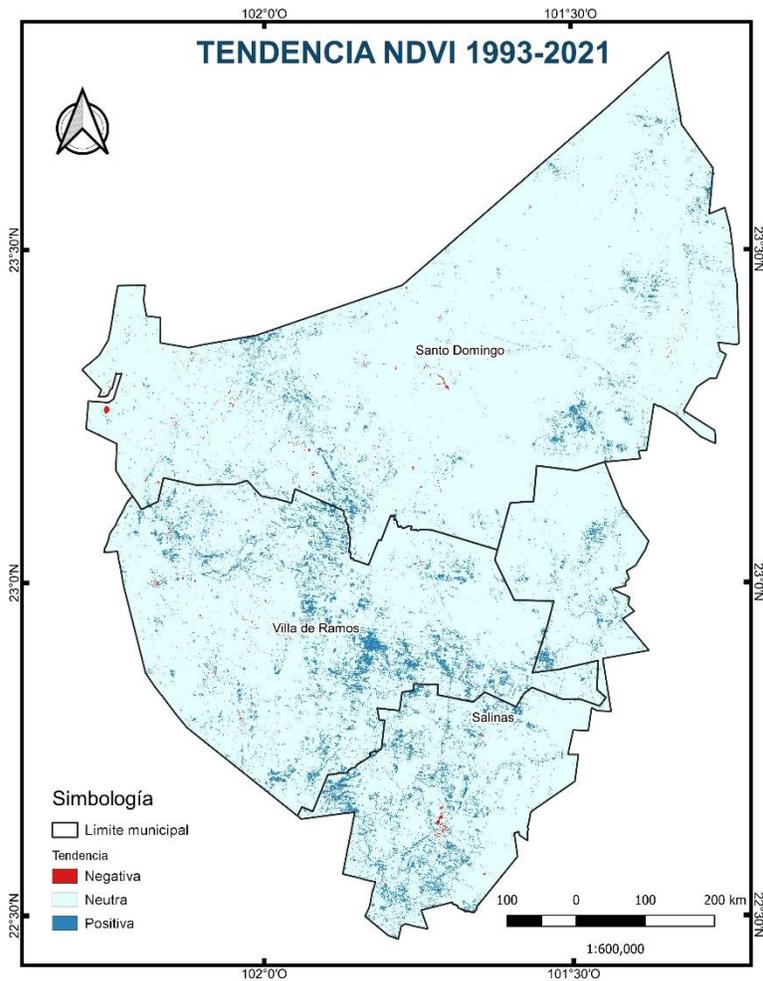


Figura 11. Distribución espacial de la tendencia del NDVI

En el caso de las áreas que presentan una tendencia positiva, estas representan una proporción del 19.7% del total, se distribuyen de forma heterogénea en toda la zona de estudio, pero tiende a concentrarse en la zona central del municipio de Villa de Ramos y en la parte sur del municipio de Salinas principalmente. De esta proporción con tendencia positiva el 43.6% se dio en el municipio de Salinas, el 13.4% en el municipio de Santo Domingo y casi el 43% se distribuye en el municipio de Villa de Ramos. Por otro lado, al igual que las áreas con tendencia neutra, las de tendencia positiva se

distribuyen principalmente en las coberturas de matorrales y de agricultura de temporal (ver Cuadro 10).

Finalmente, las áreas con tendencia negativa son poco representativas, dado que cubren una proporción un poco menos al 0.6% y se distribuyen principalmente en los municipios de Santo Domingo (36%), Villa de Ramos (33.5%) y en menor proporción en el municipio de Salinas (30.5%). De igual forma, la distribución de este tipo de tendencia se da principalmente, en áreas con agricultura de temporal para el caso de Villa de Ramos, en pastizales para el caso de Salinas, en matorrales para el caso de Santo Domingo y en zonas urbanizadas para el caso de los municipios de Villa de Ramos y Salinas.

Cuadro 10. Porcentaje de distribución espacial de la tendencia del NDVI.

| Tendencia | ADV | AGR | AGT | H2O | MAT | PAS | VSA | ZUB | Total |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| SALINAS | | | | | | | | | |
| Negativa | 0 | 0.015 | 0.021 | 0.002 | 0.029 | 0.056 | 0.005 | 0.048 | 0.176 |
| Neutra | 0 | 0.226 | 20.635 | 0.211 | 63.923 | 3.551 | 2.215 | 0.463 | 91.223 |
| Positiva | 0 | 0.005 | 2.071 | 0.012 | 5.745 | 0.361 | 0.342 | 0.065 | 8.601 |
| SANTO DOMINGO | | | | | | | | | |
| Negativa | 0 | 0.005 | 0.077 | 0.036 | 0.043 | 0.009 | 0.024 | 0.014 | 0.208 |
| Neutra | 0 | 1.161 | 13.806 | 0.459 | 66.827 | 3.216 | 11.549 | 0.140 | 97.158 |
| Positiva | 0 | 0.048 | 0.460 | 0.005 | 1.562 | 0.120 | 0.432 | 0.007 | 2.634 |
| VILLA DE RAMOS | | | | | | | | | |
| Negativa | 0.001 | 0.016 | 0.072 | 0.001 | 0.032 | 0.002 | 0.013 | 0.056 | 0.193 |
| Neutra | 0.059 | 8.351 | 35.365 | 0.536 | 39.553 | 1.215 | 5.747 | 0.518 | 91.343 |
| Positiva | 0.001 | 0.513 | 1.867 | 0.027 | 5.248 | 0.090 | 0.635 | 0.084 | 8.465 |

Tendencia: Categoría de la tendencia del NDVI derivada del análisis Mann-Kendall, ADV: Área desprovista de vegetación, AGR: Agricultura de riego, AGT: Agricultura de temporal, H2O: Agua o cuerpos de agua, MAT: Matorral, PAS: Pastizal, VSA: Vegetación secundaria arbustiva y ZUB: Zona urbana.

2.6 DISCUSIÓN

En general, los tres municipios estudiados, tienen una similar connotación ecológica, por su homogeneidad fisionómica, estructural y funcional de las comunidades vegetales que allí se desarrollan. Esa similitud está regulada por una cantidad de factores y procesos, entre los cuales la estacionalidad en la disponibilidad de agua en el suelo figura como uno los condicionantes principales.

La vegetación típica de la zona de estudio está representada por especies arbustivas (matorrales), gramíneas (pastizales) y cultivos agrícolas de temporal y riego (maíz y frijol principalmente), por su ubicación dentro del territorio estudiado que ocupan los tres municipios. Esta vegetación es bastante pobre en cuanto a densidad, ya que son comunidades que se caracterizan por presentar arbustos de poca altura, propias de climas secos, con lluvias escasas y una condición edafológica frágil que pueden favorecer procesos, como la desertificación.

En este sentido, otra característica de la zona de estudio es la distribución de superficies agrícolas, las cuales se han desarrollado en áreas donde anteriormente estaban cubiertas con la vegetación propia de la región. Los resultados de este estudio mostraron que los valores más altos del NDVI se ubicaron principalmente en estos últimos territorios y de forma mucho más específicas en las zonas con agricultura de riego, también se pudo observar la presencia de valores relativamente altos en las zonas donde se retiene la humedad del suelo como los cauces de los arroyos intermitentes.

La mayoría de los trabajos que se llevan a cabo con imágenes de satélite, utilizan imágenes con una resolución espacial media, por ejemplo aquellas derivadas del satélite MODIS (Padhee & Dutta, 2019; Salinas-Zavala et al., 2017), pero que tienen la ventaja de tener una resolución temporal alta, lo que los hace óptimos para este tipo de estudio.

Sin embargo, el uso de series de tiempo basadas en imágenes de satélite como Landsat tienen la ventaja de una mayor resolución espacial que lo hacen óptimos para áreas no muy extensas, como a la que nos enfocamos y que pueden tener características de muestreo ideales para monitorear diversos tipos de coberturas terrestres. La resolución espacial de 30 m (900 m²) del sensor Landsat, permite capturar detalles espaciales, a una escala apropiada para monitorear la estructura y composición de la vegetación (Willis, 2015). Los sensores como MODIS han sido ampliamente utilizados a escala regional; su tamaño de píxel de 250-500 m (62 500 m²-250 000 m²) lo hace inadecuado para estudios a escala local, pero útil para estudios que requieren una resolución más amplia (Nagendra et al., 2013). Caso contrario, se podría comentar del Sentinel que

proporciona imágenes con mayor resolución espacial y temporal, sin embargo, presenta el inconveniente de tener un período corto de estar activo.

Respecto al uso de un producto como la geomédiana de imágenes Landsat, una de sus principales ventajas que se obtuvo al utilizarla en este estudio, fue que se contó con una imagen compuesta de píxeles resumen, la cual mantiene consistencia espacial, incluso en los límites entre escenas. Por tanto, se contó con productos libres de ruido y listos para utilizarse, por lo que se enfocó el trabajo al proceso de análisis de la información. Adicionalmente, se mantienen las relaciones espectrales que son particularmente importantes, si se requiere un análisis adicional de la imagen compuesta, como el cálculo de las relaciones de banda en la imagen compuesta o la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático.

Sin embargo, cabe resaltar que el análisis, se llevó a cabo de forma interanual, es decir, entre los valores anuales del NDVI, por lo que limita la profundidad del trabajo, si consideramos que el comportamiento o la actividad fotosintética de las coberturas vegetales presentan una estacionalidad a lo largo de todo un año, ajustándose al comportamiento de otro tipo de fenómenos que influyen en dicha actividad fotosintética, como los aspectos climáticos (Bai et al., 2005; Sun et al., 2010).

Los valores del NDVI en áreas con 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 & Townshend, 1994). Es por esto, que una descripción detallada de la variabilidad del NDVI por tipo de vegetación para una región dada, es de gran importancia. Los resultados de este trabajo muestran que la mayor proporción de los valores promedio de NDVI en la zona de estudio oscilaron entre 0.1 y 0.4, los cuales coinciden con otros estudios realizados en ecosistemas con climas semiáridos (Weiss et al., 2004). Particularmente, se observó que el tipo de vegetación dominante (matorrales micrófilo, rosetófilo y crasicauale) presentó valores promedio entre los 0.1 y 0.3. Estos valores son similares a los reportados por otros autores sobre matorrales, en otras regiones del mundo (Defries & Townshend, 1994;

Xianliang Zhang et al., 2017). Valores mayores a 0.4 fueron observados en terrenos con actividad agrícola, principalmente de riego. Estos valores coinciden a lo descrito en estudios anteriores en diferentes regiones de México (Miranda-Aragón, 2012; Neeti et al., 2012; Salinas-Zavala et al., 2017), lo cual indica que de manera general, estos tipos de vegetación mantienen valores del NDVI más o menos similares en diferentes latitudes de México.

Para describir la dinámica de la vegetación, se calculó el coeficiente de variación (CV) interanual derivado de los valores de NDVI. El CV_{NDVI} interanual puede reflejar el cambio general de la vegetación en un período de tiempo dado (Sun et al., 2010). Los valores más bajos de NDVI y más altos de CV_{NDVI} se registraron cerca y dentro de las principales zonas agrícolas del área de estudio y también donde se identificaron cuerpos de agua intermitentes, lo que sugiere que la tendencia negativa y significativa de los valores de NDVI, está directamente relacionada a la actividad agrícola. Sin embargo, hay que considerar que el CV_{NDVI} es un indicador adimensional; todos los valores de CV_{NDVI} están en la misma escala de magnitud, lo que facilita las comparaciones de los datos recopilados durante diferentes períodos de tiempo. El CV representa la dispersión de los valores de NDVI en relación con el valor medio a lo largo del tiempo. Un cambio positivo en el valor de un CV_{NDVI} a nivel de píxel a lo largo del tiempo se relaciona con una mayor dispersión de valores, no con aumentos de NDVI; de manera similar, una dispersión de CV_{NDVI} negativo significa una dispersión decreciente de NDVI alrededor de los valores medios, no una disminución de NDVI. Como indicador de la variabilidad, el CV_{NDVI} puede combinarse con otros indicadores, para detectar la degradación o mejoramiento de la tierra (Bai et al., 2005).

La prueba de tendencia de Mann-Kendall, es una técnica popular para probar si una serie temporal de observaciones satelitales, aumenta o disminuye de forma constante, esta consistencia se conoce como monotonidad, y la función que la describe se llama función monótona (Abdi et al., 2019). Al analizar los resultados, se encontró que en la zona la mayor proporción de píxeles, se encuentran entre los valores neutros, los cuales se presentan dentro del rango -0.25 a 0.5, concentrándose principalmente entre 0.2 y 0.5, es decir, que tiende a concentrarse dentro una tendencia positiva. Por tanto, el área

se relaciona con un aumento del vigor de la vegetación y que coincide con la línea de tendencia del NDVI promedio. Esto está acorde con el estudio llevado a cabo por Maldonado-Enríquez et al. (2020) donde sus resultados indicaron que el vigor de la vegetación en la Región del Cabo aumentó en los últimos años; sin embargo, sus resultados difieren de una tendencia descrita previamente en la misma área, que mostró tendencias negativas del NDVI, al utilizar imágenes MODIS, esta variación se atribuyó a la resolución espacial de las imágenes, el período de estudio y los fenómenos naturales estacionales, en relación con el clima y la vegetación.

Asimismo, los resultados se ajustan de forma general con los obtenidos por Miranda-Aragón (2012) quienes señalan que, al analizar una serie temporal con imágenes del satélite MODIS en la porción Norte-Central a través de la técnica de componentes principales obtuvo como resultado una tendencia ascendente en la serie temporal de NDVI durante el período estudiado y se validó con datos históricos auxiliares del área de producción del cultivo.

El presente trabajo adolece, de un análisis de correlación del NDVI con variables climáticas y topográficas, las cuales, pueden influir o controlan de manera significativa la distribución de la vegetación, principalmente en áreas donde la actividad fotosintética está supeditada al inicio y fin de la temporada de precipitaciones, principalmente en regiones áridas y semiáridas, donde la distribución de la vegetación está ciertamente ligada al comportamiento de la precipitación y la humedad del suelo, esta última figura como una de las condicionantes principales y controladores de la estructura, función y diversidad de los ecosistemas (Sun et al., 2010) .

Sin embargo, Alatorre et al. (2014), señalan que, en algunas ocasiones las variables como las climáticas no explican dichas tendencias, como por ejemplo, se puede presentar una tendencia negativa, la cual explica una disminución de la actividad vegetal por efecto de una degradación o pérdida de la vegetación, esto debido a que existen procesos lentos pero consistentes, de degradación de las comunidades vegetales, por actividades humanas como el sobrepastoreo, las actividades agrícolas, la extracción de leña, entre otras.

Ante lo señalado, se necesita llevar a cabo una investigación más detallada, que permita explorar las fuerzas impulsoras asociadas, con la variación temporal y espacial de la vegetación, a través de los índices de vegetación (como el clima y la topografía) esto, por un lado. Por el otro, comparar diferentes resultados mediante los índices de vegetación existentes (NDVI, SAVI, entre otros), que se ajusten a las condiciones ambientales, propias de una área de estudio, como son las zonas secas o áreas agrícolas; adicional a esto, considerar también el uso de diferentes fuentes de datos satelitales como MODIS, Landsat, Sentinel, etc., ya sea de forma separada o fusionada que permita aprovechar las ventajas de uno u otro sensor; y con esto definir una estrategia adecuada de validación de los resultados del proceso de análisis. Esta información podría conjugarse con un trabajo de investigación como el estudio bibliométrico que ayudaría ampliar el conocimiento actual en este campo.

2.7 CONCLUSIONES

Este estudio representa una base para seguir con la búsqueda de ciertos patrones de cambio como el NDVI a lo largo del tiempo que puedan ser indicadores del estado en que se encuentran los ecosistemas de la zona semiárida del Altiplano Potosino, cuyos resultados puedan ser útiles en el planteamiento estratégico para el manejo sostenible de tierras y finalmente para la toma de decisiones en el territorio estudiado. Los resultados obtenidos del estudio indican que:

- El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) derivado de compuestos anuales de la geomediana permitieron estimar el estado y vigor vegetal de las coberturas presentes en el territorio que abarca el entorno de los tres municipios estudiados, el índice presentó diferencias para cada cobertura vegetal.
- Con respecto a la distribución espacial de la cobertura vegetal, ésta tuvo una tendencia general alta en las porciones centrales del área de estudio, principalmente en el municipio de Villa de Ramos. La tendencia baja se ubicó principalmente en los municipios de Salinas y Villa de Ramos y tendencias moderadas se dieron principalmente el municipio de Santo Domingo.
- El uso de imágenes y las tendencias interanuales fueron calculados mediante el análisis de tendencias monotónicas de Mann-Kendall, respectivamente. Esto permitió observar la respuesta de la vegetación que se deduce corresponden a variaciones climáticas considerando las características ambientales del área de estudio.
- En relación con las variaciones temporales el NDVI promedio anual de la cobertura vegetal fluctuó en un rango de 0.18 a 0.22 en 2013-2021. El NDVI presentó las mayores variaciones en los años 2010 y 2015. Sin embargo, las variaciones no presentaron una tendencia significativa.

- La variación del NDVI, la cobertura vegetal en la zona de estudio se mantuvo estable con 73.4% de las áreas cubiertas de vegetación, fluctuando en un rango bajo a medio, mientras que el 27.6% de las áreas varió con una gran amplitud.
- Se requiere una investigación más detallada que permita estudiar el análisis espacio-temporal de la vegetación, a través de series de tiempo de imágenes ópticas, como las de Landsat, para explorar no solo las fuerzas impulsoras de los cambios, sino también los resultados que se puedan obtener con los diferentes índices de vegetación y fuentes de datos, que apoyen trabajos de gestión medio-ambiental, agrícola, entre otros.

CONCLUSIONES GENERALES

Dentro de los objetivos planteados en el estudio fue conocer en primera instancia las temáticas emergentes a través de la revisión de la estructura intelectual de la aplicación de la Teledetección de la vegetación mediante técnicas bibliométricas. El siguiente objetivo fue conocer y clasificar la vegetación en base a su variabilidad espacial y temporal del NDVI a través del análisis de una serie temporal de imágenes Landsat en tres municipios del Altiplano Potosino. Con el primer objetivo se logró identificar un conjunto de ocho grupos temáticos donde destaca el uso de la Teledetección en el monitoreo de la dinámica de la vegetación, el uso del índice de vegetación NDVI para estudios del cambio climático, así como el uso de la Teledetección a través de nuevas plataformas de monitoreo como los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y de radar, el uso de imágenes hiperespectrales o de nuevas técnicas de análisis como la de basado en objetos o de aprendizaje automático todos ello en diferentes ámbitos naturales de aplicación como las zonas húmedas, vegetación acuática o de zonas árticas y secas; por lo que de acuerdo a este enfoque nos permitió revelar detalles de la base teórica de estudio y captar las temáticas emergentes que se están produciendo en este campo, por lo que podría aplicarse en un futuro para la revisión de la literatura y conocer las tendencias de investigación sobre temas particulares de interés.

Para el caso del análisis de la variabilidad espacio-temporal del NDVI en las coberturas vegetales de la zona del estudio del Altiplano Potosino el estudio demostró la utilidad de los datos de las series de tiempo de satélites como el Landsat disponibles gratuitamente para analizar las tendencias de la dinámica de la vegetación. La contextualización espacial de las tendencias estadísticamente significativas, considerando el tipo de vegetación y la cobertura/uso de la tierra, mostró la distribución espacial de las áreas y tipos de coberturas afectados por el cambio. Este estudio representa una base para seguir con la búsqueda de ciertos patrones de cambio a lo largo del tiempo, que puedan ser indicadores del estado en que se encuentran los diversos usos o coberturas terrestres no sólo en ámbitos naturales como la zona de estudio sino también en otras áreas cuyos resultados puedan ser útiles no sólo en su identificación sino también en el

planteamiento estratégico para el manejo sostenible de tierras y finalmente para la toma de decisiones en el territorio.

LITERATURA CITADA

- Abdi, A. M., Boke-Olén, N., Jin, H., & Eklundh, L. (2019). First assessment of the plant phenology index (PPI) for estimating gross primary productivity in African semi-arid ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 249–260.
- Abdullah, M., Gholoum, M. M., & Abbas, H. A. (2018). Satellite vs. UAVs Remote Sensing of Arid Ecosystems: A Review with in an Ecological Perspective. *Environmental Analysis and Ecology Studies*, 2(3), 1–5.
<https://doi.org/10.31031/EAES.2018.02.000540>
- Alatorre, L., Miramontes-Beltrán, S., García-Peña, A., Díaz-Caravantes, R. E., & Bravo, L. (2014). Evolución de la dinámica vegetal mediante una serie de imágenes Landsat TM (1986-2011). *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 40(2), 449–476. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4847432>
- Albort-Morant, G., Henseler, J., Leal-Millán, A., & Cepeda-Carrión, G. (2017). Mapping the Field: A Bibliometric Analysis of Green Innovation. *Sustainability*, 9(6), 1011. <https://doi.org/10.3390/su9061011>
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Bai, Y., Sun, X., Ji, Y., Huang, J [Jianhua], Fu, W., & Shi, H. (2021). Bibliometric and visualized analysis of deep learning in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 1–38. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1949069>
- Bai, Z., Dent, D., & Schaepman, M. (2005). *Quantitative Global Assessment of Land Degradation and Improvement: pilot study in North China: Report 2005/06*. World Spil Information (ISRIC), Wageningen University.

- Bannari, A., Asalhi, H., & Teillet, P. M. (2002). *Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping*. IEEE. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, ON, Canada.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026867>
- Bellis, N. de. (2009). *Bibliometrics and citation analysis: From the Science citation index to cybermetrics*. Scarecrow Press.
- Chakraborty, A., & Kumar-Sehgal, V. (2010). Assessment of Agricultural Drought Using MODIS Derived Normalized Difference Water Index. *Journal of Agricultural Physics*, 10(2010), 28–36.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7), 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Colditz, R. R. (2007). *Time Series Generation and Classification of MODIS Data for Land Cover Mapping* [Tesis de Doctorado]. Universität Würzburg, Würzburg.
https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/opus4-wuerzburg/frontdoor/deliver/index/docId/2221/file/Dissertation_Colditz_neu.pdf
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Salinas de Hidalgo (2403), Estado de San Luis Potosí*. Comisión Nacional del Agua.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Corsini, F., Certomà, C., Dyer, M., & Frey, M. (2019). Participatory energy: Research, imaginaries and practices on people' contribute to energy systems in the smart city. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 322–332.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.028>
- de Oliveira, J. O., da Silva, F. F., Juliani, F., Barbosa, L. C., & Nunhes, T. V. (2019). Bibliometric method for mapping the state-of-the-art and identifying research gaps and Trends in Literature: An Essential Instrument to support the development of scientific projects. In S. Kunosic & E. Zerem (Eds.),

- Scientometrics Recent Advances*. IntechOpen.
<https://www.intechopen.com/chapters/69867>
- Dech, S [S.], Kuenzer, C [C.], & Wagner, W [W.] (Eds.). (2015). *Remote sensing and digital image processing: Vol. 22. Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics* (1st ed. 2015). Springer International Publishing; Imprint: Springer.
- Defries, R. S., & Townshend, J. R. (1994). NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), 3567–3586.
<https://doi.org/10.1080/01431169408954345>
- Dhar, S., Goswami, S., Sarup, J., & Matin, S. (2021). Analysis of vegetation dynamics using remote sensing and GIS: a case study of Madhya Pradesh, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1039–1051.
<https://doi.org/10.1007/s40808-020-00998-1>
- di Gregorio, A. (2016). *Land Cover Classification System. Software version 3: Classification Concepts*. FAO.
- Disney, M. (2016). Remote Sensing of Vegetation: Potentials, Limitations, Developments and Applications. In N. P. R. Anten, K. Hikosaka, & Ü. Niinemets (Eds.), *Advances in Photosynthesis and Respiration, Including Bioenergy and Related Processes: Vol. 42. Canopy Photosynthesis From Basics to Applications* (1st ed., 289-331). Springer Netherlands; Imprint: Springer.
- Duan, P., Wang, Y [Yeqiao], & Yin, P. (2020). Remote Sensing Applications in Monitoring of Protected Areas: A Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*, 12(5), 772. <https://doi.org/10.3390/rs12050772>
- Dutra, D. J., Elmiro, M. A. T., & Garcia, R. A. (2020). Comparative analysis of methods applied in vegetation cover delimitation using Landsat 8 images. *Sociedade & Natureza*, 32, 699–710. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-56139>
- Eastman, R. J., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y [Yongming], Machado, E. A., & Crema, S. C. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721–2726.
<https://doi.org/10.1080/01431160902755338>

- Eckert, S., Hüsler, F., Liniger, H., & Hodel, E. (2015). Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 113, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001>
- El-Beltagy, A., & Madkour, M. (2012). Impact of climate change on arid lands agriculture. *Agriculture & Food Security*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-3>
- Erasmi, S., Propastin, P., Kappas, M., & Panferov, O. (2009). Spatial Patterns of NDVI Variation over Indonesia and Their Relationship to ENSO Warm Events during the Period 1982–2006. *Journal of Climate*, 22(24), 6612–6623. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2460.1>
- FAO. (2019). *Trees, forests and land use in drylands: the first global assessment: Full report* (Vol. 184). FAO Forestry.
- FAO, & PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*. R. FAO.
- Fassnacht, F. E., Schiller, C., Kattenborn, T., Zhao, X., & Qu, J. (2019). A Landsat-based vegetation trend product of the Tibetan Plateau for the time-period 1990–2018. *Scientific Data*, 6(1), 78. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0075-9>
- Fensholt, R., & Proud, S. R. (2012). Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.015>
- Ferreira, B., Silva, R. G., & Iten, M. (2022). Earth Observation Satellite Imagery Information Based Decision Support Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 14(15), 3776. <https://doi.org/10.3390/rs14153776>
- Frantz, D. (2019). FORCE—Landsat + Sentinel-2 Analysis Ready Data and Beyond. *Remote Sensing*, 11(9), 1124. <https://doi.org/10.3390/rs11091124>
- Gálvez, C. (2018). Aplicación de indicadores bibliométricos relacionales en la investigación Biomédica: Una propuesta basada en análisis de co-palabras. In A. García Manso (Ed.), *Ediciones universitarias. Aportaciones de vanguardia en la investigación actual* (1st ed., pp. 145–157). Tecnos.

- Gálvez Toro, A., & Amezcua, M. (2006). El factor h de Hirsch: the h-index: Una actualización sobre los métodos de evaluación de los autores y sus aportaciones en publicaciones científicas. *Index De Enfermería*, 15(55).
<https://doi.org/10.4321/S1132-12962006000300009>
- Gao, B. C. (1996). NdwI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Garfield, E [E.] (1972). Citation analysis as a tool in journal evaluation. *Science (New York, N. Y.)*, 178(4060), 471–479. <https://doi.org/10.1126/science.178.4060.471>
- Garfield, E [Eugene] (2006). The history and meaning of the journal impact factor. *JAMA*, 295(1), 90–93. <https://doi.org/10.1001/jama.295.1.90>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gómez, C., White, J. C [J. C.], & Wulder, M. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 55–72.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>
- González, R. C., & Woods, R. E. (2017). *Digital Image Processing: Global Edition* (4. Auflage). Pearson Education, Limited.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gurney, T., Horlings, E., & van den Besselaar, P. (2012). Author disambiguation using multi-aspect similarity indicators. *Scientometrics*, 91(2), 435–449.
<https://doi.org/10.1007/s11192-011-0589-1>
- Gusenbauer, M. (2019). Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases. *Scientometrics*, 118(1), 177–214. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2958-5>
- Gusenbauer, M., & Haddaway, N. R. (2020). Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of

- Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. *Research Synthesis Methods*, 11(2), 181–217. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1378>
- Guzmán-Sánchez, M. V. (2009). *ViBlioSOM: Metodología para la Visualización de Información métrica con Mapas Auto-organizados* [Tesis de Doctorado]. Universidad de la Habana.
<http://eduniv.reduniv.edu.cu/index.php?page=13&id=1440&db=1>
- Hijmans, R. J., van Etten, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J. A., Lamigueiro, O. P., Bevan, A., Racine, E. B., Shortridge, A., & others. (2015). *Package 'raster'* (Version 3.6-11) [Computer software]. <https://rspatial.org/raster>
- Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(46), 16569–16572.
- Huang, J [J.], Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., Shinoda, M., Ma, Z., Guo, W., Li, Z [Z.], Zhang, L [L.], Liu, Y [Y.], Yu, H., He, Y., Xie, Y [Y.], Guan, X., Ji, M., Lin, L., Wang, S., . . . Wang, G [G.] (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719–778.
<https://doi.org/10.1002/2016RG000550>
- Huylenbroeck, L., Laslier, M., Dufour, S., Georges, B., Lejeune, P., & Michez, A. (2020). Using remote sensing to characterize riparian vegetation: A review of available tools and perspectives for managers. *Journal of Environmental Management*, 267, 110652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110652>
- INEGI. (2002). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía: Climatología*. Aguascalientes, Ags. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1000000: Unidades climáticas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Serie 1.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI. (2016). Catálogo de Tipos de Vegetación Natural e Inducida de México: Anexo. In *Lineamientos para el uso y actualización del Catálogo de Tipos de Vegetación Natural e Inducida de México con fines estadísticos y geográficos*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. chrome-

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.snieg.mx/Documentos/Normatividad/Vigente/cat_tem_gen_tipos_veg_oct2016.pdf
- INEGI. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía de uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000, serie VI*. INEGI.
- INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación: Escala 1:250,000 Serie VII*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- INEGI. (2020). *Producción y publicación de la Geomediana Nacional a partir de las imágenes del Cubo de Datos Geoespaciales de México: Documento metodológico*.
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico de San Luis Potosí 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Jardel-Peláez, E. J. (2015). *Guía para la caracterización de hábitats forestales*. SEMARNAT, CONAFOR, GEF, PNUD.
- Jardel-Peláez, E. (2015). *Guía para la caracterización y clasificación de hábitats forestales*. Comisión Nacional Forestal y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Jensen, J. I. (2014). *Remote Sensing of the Environment an Earth Resource Perspective* (Second). Pearson Education Limited.
- Jha, S., & Srivastava, R. (2018). Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and semi-arid regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.013>
- Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Cao, R., Zhang, Y [Yunfei], & Shen, W. (2015). Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 51, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.031>
- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press.
- Jong, R. de, Bruin, S. de, Wit, A. de, Schaepman, M. E., & Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692–702.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>

- Jwan Al-doski, Shattri B. Mansor, H'ng Paik San, & Zailani Khuzaimah (2020). Land Cover Mapping Using Remote Sensing Data. *American Journal of Geographic Information System*, 9(1), 33–45.
<http://article.sapub.org/10.5923.j.ajgis.20200901.04.html>
- Karlsen, SR, Høgda, K. A., Wielgolaski, F. E., Tolvanen, A., Tømmervik, H., Poikolainen, J., & Kubin, E. (2009). Growing-season trends in Fennoscandia 1982–2006, determined from satellite and phenology data. *Climate Research*, 39, 275–286. <https://doi.org/10.3354/cr00828>
- Kennedy, R. E., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W. B., Bolstad, P., Wang, Y. Q., & Adams, P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1382–1396.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.018>
- Küchler, A. W., & Zonneveld, I. S. (1988). *Vegetation mapping: Handbook of vegetation science*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3083-4>
- Kuenzer, C [Claudia], Dech, S [Stefan], & Wagner, W [Wolfgang]. (2015). Remote sensing time series revealing land surface dynamics:: Status quo and the pathway ahead. In S. Dech, C. Kuenzer, & W. Wagner (Eds.), *Remote sensing and digital image processing: Vol. 22. Remote sensing time series: Revealing land surface dynamics* (1st ed., pp. 1–24). Springer International Publishing; Imprint: Springer.
- Lawley, V., Lewis, M., Clarke, K., & Ostendorf, B. (2016). Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review. *Ecological Indicators*, 60, 1273–1283.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.021>
- Lemmens, M. (2011). Geo-information Technology – What It Is, How It Was and Where It Is Heading to. In M. J. P. M. Lemmens (Ed.), *Geotechnologies and the environment: volume 5. Geo-information: Technologies, applications and the environment* (pp. 1–22). Springer.
- Li, T [Tong], Cui, L., Xu, Z., Hu, R., Joshi, P. K., Song, X., Tang, L., Xia, A., Wang, Y [Yanfen], Da Guo, Zhu, J., Hao, Y., Song, L., & Cui, X. (2021). Quantitative

- Analysis of the Research Trends and Areas in Grassland Remote Sensing: A Scientometrics Analysis of Web of Science from 1980 to 2020. *Remote Sensing*, 13(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/rs13071279>
- Maldonado-Enríquez, D., Ortega-Rubio, A., Breceda-Solís Cámara, A. M., Díaz-Castro, S. C., Sosa-Ramírez, J., & Martínez-Rincón, R. O. (2020). Trend and variability of NDVI of the main vegetation types in the Cape Region of Baja California Sur. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 91(0), 913213. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3213>
- Mander, L., Dekker, S. C., Li, M., Mio, W., Punyasena, S. W., & Lenton, T. M. (2017). A morphometric analysis of vegetation patterns in dryland ecosystems. *Royal Society Open Science*, 4(2), 160443. <https://doi.org/10.1098/rsos.160443>
- Martín-Armario, E., Acedo-González, F. J., & Martín-Ruiz, D. (2006). Los frentes de investigación dominantes en Marketing. *Revista Española De Investigación De Marketing ESIC*, 10(1), 93–110. https://aemark.org/esic/2006/070704_190703_E.pdf
- Masenyama, A., Mutanga, O., Dube, T., Bangira, T., Sibanda, M., & Mabhaudhi, T. (2022). A systematic review on the use of remote sensing technologies in quantifying grasslands ecosystem services. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1000–1025. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2088652>
- Mathews, E., Payne, R., Rohweber, M., & Murray, S. (2000). *Pilot analysis of global ecosystems: Forest ecosystems*. World Resources Institute.
- McLeod, A. I. (2015). *Package 'Kendall'* (Version 2.2.1) [Computer software]. <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim>
- Miguel, S., Moya-Anegón, F., & Herrero-Solana, V. (2007). El análisis de co-citas como método de investigación en Bibliotecología y Ciencia de la Información. *Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología E Información*, 21(43). <https://doi.org/10.22201/iibi.0187358xp.2007.43.4129>
- Milich, L., & Weiss, E. (2000). GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 235–260. <https://doi.org/10.1080/014311600210812>

- Miranda, F., & Hernández, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín De La Sociedad Botánica De México*, 28.
<https://doi.org/10.17129/botsci.1084>
- Miranda-Aragón, L. (2012). NDVI-rainfall relationship using hyper-temporal satellite data in a portion of North Central Mexico (2000-2010). *AFRICAN JOURNAL of AGRICULTURAL RESEEARCH*, 7(6). <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1674>
- Mitchell, A. L., Rosenqvist, A., & Mora, B. (2017). Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0078-9>
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J [C. J.], Asrar, G., & Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386(6626), 698–702. <https://doi.org/10.1038/386698a0>
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jogman, R. H., Tarantino, C., Adamo, M., & Mairota, P. (2013). Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
- Nduku, L., Kalumba, A. M., Munghemezulu, C., Mashaba-Munghemezulu, Z., Chirima, G. J., Afuye, G. A., & Busayo, E. T. (2021). Earth Observation Systems and Pasture Modeling: A Bibliometric Trend Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 793. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110793>
- Neeti, N., Rogan, J., Christman, Z., Eastman, J. R., Millones, M., Schneider, L., Nickl, E., Schmook, B., Turner, B. L., & Ghimire, B. (2012). Mapping seasonal trends in vegetation using AVHRR-NDVI time series in the Yucatán Peninsula, Mexico. *Remote Sensing Letters*, 3(5), 433–442.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2011.616238>
- Nelson, P. R., Maguire, A. J., Pierrat, Z., Orcutt, E. L., Yang, D., Serbin, S. P., Frost, G. V., Macander, M. J., Magney, T. S., Thompson, D. R., Wang, J [Jonathan], Oberbauer, S. F., Vargas Zesati, S. A., Davidson, S. J., Epstein, H., Unger, S., Campbell, P. K., Carmon, N., Velez-Reyes, M., & Huemmrich, K. F. (2021). Remote Sensing of Tundra Ecosystems using High Spectral Resolution

- Reflectance: Opportunities and Challenges. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1002/essoar.10508585.1>
- Ogashawara, I. (2021). Bibliometric Analysis of Remote Sensing of Inland Waters Publications from 1985 to 2020. *Geographies*, 1(3), 346–361.
<https://doi.org/10.3390/geographies1030019>
- Orynbaikyzy, A., Gessner, U., & Conrad, C. (2019). Crop type classification using a combination of optical and radar remote sensing data: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17), 6553–6595.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1569791>
- Padhee, S. K., & Dutta, S. (2019). Spatio-Temporal Reconstruction of MODIS NDVI by Regional Land Surface Phenology and Harmonic Analysis of Time-Series. *GIScience & Remote Sensing*, 56(8), 1261–1288.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1646977>
- Pang, G., Wang, X [Xuejia], & Yang, M. (2017). Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012. *Quaternary International*, 444, 87–96.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.08.038>
- Pedraza, S., Clerici, N., Zuluaga Gaviria, J. D., & Sanchez, A. (2021). Global Research on Riparian Zones in the XXI Century: A Bibliometric Analysis. *Water*, 13(13), 1836. <https://doi.org/10.3390/w13131836>
- Peng, J., Liu, Z., Liu, Y [Yinghui], Wu, J., & Han, Y. (2012). Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai–Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 14(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.011>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J [Compton J.], & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

- Pham-Duc, B., & Nguyen, H. (2022). A bibliometric analysis on the visibility of the Sentinel-1 mission in the scientific literature. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10089-3>
- Pritchard, R. (1969). Statistical bibliography or bibliometrics. *Journal of Documentation*, 25(4), 348–349.
- QGIS Development Team. (2020). *QGIS Geographic Information System* (Version 3.16 Hannover) [Computer software]. <http://qgis.osgeo.org>
- Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chahabra, A., DeFries, R. S., Foley, J. A., Geist, H., Houghton, R. A., Goldewijk, K. K., Lambin, E. F., Millington, A., Rasmussen, K., Reid, R. S., & Turner II, B. L. (2008). Global Land-Cover Change: Recent Progress, Remaining Challenges. In E. F. Lambin & H. J. Geist (Eds.), *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (pp. 9–39). Springer Science & Business Media.
- Roberts, D., Dunn, B., & Mueller, N. (2018, July 22). *Open Data Cube Products Using High-Dimensional Statistics of Time Series*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, España. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518312>
- Roberts, D., Mueller, N., & Mcintyre, A. (2017). High-dimensional pixel composites from earth observation time series. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(11), 6254–6264.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Salinas-Zavala, C. A., Martínez-Rincón, R. O., & Morales-Zárate, M. V. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California. *Investigaciones Geográficas*. Advance online publication. <https://doi.org/10.14350/ig.57214>
- Sanz-Casado, E., & Martín-Moreno, C. (1998). Aplicación de técnicas bibliométricas a la gestión bibliotecaria. *Investigación Bibliotecología*, 12(24), 24–40.

- SEMARNAT. (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y crecimiento verde*. México. SEMARNAT.
- Shi, X., Zhang, X [Xinyue], Lu, S., Wang, T., Zhang, J., Liang, Y., & Deng, J. (2022). Dryland Ecological Restoration Research Dynamics: A Bibliometric Analysis Based on Web of Science Data. *Sustainability*, 14(16), 9843. <https://doi.org/10.3390/su14169843>
- Siłuch, M., Bartmiński, P., & Zglobicki, W. (2022). Remote Sensing in Studies of the Growing Season: A Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*, 14(6), 1331. <https://doi.org/10.3390/rs14061331>
- Simoës, R., Camara, G., Queiroz, G., Souza, F., Andrade, P. R., Santos, L., Carvalho, A., & Ferreira, K. (2021). Satellite Image Time Series Analysis for Big Earth Observation Data. *Remote Sensing*, 13(13), 2428. <https://doi.org/10.3390/rs13132428>
- Simonetti, E., Simonetti, D., & Preatoni, D. (2014). *Phenology-based land cover classification using Landsat 8 time series* (JRC Technical Reports EUR 26841). European Commission. https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/lb-na-26841-en-n_.pdf
- Singh, A. P., Yerudkar, A., Mariani, V., Iannelli, L., & Glielmo, L. (2022). A Bibliometric Review of the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture and Precision Viticulture for Sensing Applications. *Remote Sensing*, 14(7), 1604. <https://doi.org/10.3390/rs14071604>
- Singh, A. (1989). Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Small, H. (1973). Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, 24(4), 265–269. <https://doi.org/10.1002/asi.4630240406>
- Sruthi, S., & Aslam, M. M. (2015). Agricultural Drought Analysis Using the NDVI and Land Surface Temperature Data; a Case Study of Raichur District. *Aquatic Procedia*, 4, 1258–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.164>

- Stucky, B. J., Guralnick, R., Deck, J., Denny, E. G., Bolmgren, K., & Walls, R. (2018). The Plant Phenology Ontology: A New Informatics Resource for Large-Scale Integration of Plant Phenology Data. *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 517, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00517>
- Sudmanns, M., Tiede, D., Augustin, H., & Lang, S. (2020). Assessing global Sentinel-2 coverage dynamics and data availability for operational Earth observation (EO) applications using the EO-Compass. *International Journal of Digital Earth*, 13(7), 768–784. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1572799>
- Sun, Z., Chang, N.-B., & Opp, C. (2010). Using SPOT-VGT NDVI as a successive ecological indicator for understanding the environmental implications in the Tarim River Basin, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1), 43554. <https://doi.org/10.1117/1.3518454>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tassi, A., & Vizzari, M. (2020). Object-oriented lulc classification in google earth engine combining snic, glcm, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(22), 3776.
- Thompson, S. E. (2010). *Spatial Patterns in Dryland Vegetation and the Significance of Dispersal, Infiltration and Complex Topography*. Duke University.
- Tošić, I. (2004). Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro. *Theoretical and Applied Climatology*, 77(1-2), 47–56. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0022-7>
- Tucker, C. J [C. J.], Newcomb, W. W., Los, S. O., & Prince, S. D. (1991). Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1133–1135. <https://doi.org/10.1080/01431169108929717>
- Tucker, C. J [C. J.], Slayback, D. A., Pinzon, J. E., Los, S. O., Myneni, R. B., & Taylor, M. G. (2001). Higher northern latitude normalized difference vegetation

- index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 45(4), 184–190. <https://doi.org/10.1007/s00484-001-0109-8>
- Tucker, C. J [Compton J.] (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E., & Dahm, C. N. (2004). Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 249–272. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2003.07.001>
- Weng, Q. (Ed.). (2018). *Imaging science series. Remote sensing time series image processing*. Taylor & Francis.
- White, J. C [Joanne C.], Hermosilla, T., Wulder, M. A., & Coops, N. C. (2022). Mapping, validating, and interpreting spatio-temporal trends in post-disturbance forest recovery. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112904. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112904>
- Willis, K. S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 182, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006>
- Woodcock, C. E., Loveland, T. R., Herold, M., & Bauer, M. E. (2020). Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: A paradigm shift. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111558>
- Wulder, M. A., White, J. C [Joanne C.], Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Belward, A. S., Cohen, W. B., Fosnight, E. A., Shaw, J., Masek, J. G., & Roy, D. P. (2016). The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, 185(3), 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>

- Xiao, P., Qian, P., Xu, J., & Lu, M. (2022). A Bibliometric Analysis of the Application of Remote Sensing in Crop Spatial Patterns: Current Status, Progress and Future Directions. *Sustainability*, 14(7), 4104. <https://doi.org/10.3390/su14074104>
- Xie, Y [Yichun], Sha, Z., & Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1), 9–23. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>
- Xu, Y., Yang, Y., Chen, X., & Liu, Y [Yangxiaoyue] (2022). Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021. *Remote Sensing*, 14(16), 3967. <https://doi.org/10.3390/rs14163967>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yamashkin, S. A., Yamashkin, A. A., Zanozin, V. V., Radovanovic, M. M., & Barmin, A. N. (2020). Improving the Efficiency of Deep Learning Methods in Remote Sensing Data Analysis: Geosystem Approach. *IEEE Access*, 8, 179516–179529. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028030>
- Yan, E., Wang, G [Guangxing], Lin, H., Xia, C., & Sun, H. (2015). Phenology-based classification of vegetation cover types in Northeast China using MODIS NDVI and EVI time series. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 489–512. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.999167>
- Yildirim, T., & Asik, S. (2018). Index-based Assessment of Agricultural Drought using Remote Sensing in the Semi-arid Region of Western Turkey. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 24(4), 510–516. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.337136>
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ecy.1730>
- Yuan, Q., Shen, H., Li, T [Tongwen], Li, Z [Zhiwei], Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J [Jiwen], Gao, J., & Zhang, L [Liangpei] (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241, 111716. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>

- Zhang, X [X.], Sun, R., Zhang, B., & Tong, Q. (2008). Land cover classification of the North China Plain using MODIS_EVI time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 476–484.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.02.005>
- Zhang, X [Xianliang], Wu, S., Yan, X., & Chen, Z. (2017). A global classification of vegetation based on NDVI, rainfall and temperature. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2318–2324. <https://doi.org/10.1002/joc.4847>
- Zhang, Y [Yunlong], Wang, X [Xuan], Li, C., Cai, Y [Yanpeng], Yang, Z., & Yi, Y. (2018). NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China. *Scientific Reports*, 8(1), 1–13.
- Zhao, Q., Le Yu, Du, Z., Peng, D., Hao, P., Zhang, Y [Yongguang], & Gong, P. (2022). An Overview of the Applications of Earth Observation Satellite Data: Impacts and Future Trends. *Remote Sensing*, 14(8), 1863. <https://doi.org/10.3390/rs14081863>
- Zuñiga-Vásquez, J. M., & Aguirre-Salado, C. A. (2020). Monitoring vegetation using remote sensing time series data: a review of the period 1996-2017. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias UNCuyo*, 52(1), 175–189.
<http://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/2981>
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Aguirre-Salado, C. A., & Pompa-García, M. (2020). Monitoring vegetation using remote sensing time series data: a review of the period 1996-2017. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias UNCuyo*, 52(1), 175–189.
<https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/2981>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472.
<https://doi.org/10.1177/1094428114562629>