

Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Informática de Culiacán
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio
Posgrado de Ciencias de la Información



**Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía
temática para la simulación de modelos geoespaciales para
obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de
Sinaloa, México**

T E S I S

Como requisito para obtener el grado de
Maestro de Ciencias de la Información

Miguel Armando López Beltrán

Director de tesis: Dr. Juan Martín Aguilar Villegas

Co-director de tesis: Dr. Wenseslao Plata Rocha

Culiacán, Sinaloa, México
Febrero de 2014

Dedicatoria

A MIS PADRES

Le doy gracias a mi madre Luz Marlen Beltrán Leal y mi padre Miguel López Meza, por haberme dado la vida, amor, y apoyo incondicional en todos los momentos en la vida que he pasado en los buenos y malos momentos, por ese amor que solo los padres nos pueden dar. Les agradezco por el apoyo que me han dado y brindado en el transcurso de mi vida.

A MIS HERMANAS

Por el cariño que me han brindado mis hermanas Marayma Guadalupe y Marlen Lizbeth, por su apoyo y comprensión y saber que cuento con ellas para lo que sea, agradeciendo a la vida los momentos que he pasado con ellas.

A MI FAMILIA

Por estar conmigo y pasar momentos tan agradables y sentirme querido por ellos.

A MI PAREJA

Mariana Rangel Ojeda, que durante todos estos años me ha apoyado con su amor y cariño, estando siempre pendiente de mi cuando más la necesito, por aquella motivación que me brinda para superarme en todos los aspectos.

Agradecimientos

La finalización de esta tesis, fue un esfuerzo en conjunto, que de manera directa e indirecta han participado varias personas:

- Un agradecimiento especial a mis dos directores de tesis, el Doctor Juan Martín Aguilar Villegas y el Doctor Wenseslao Plata Rocha, por su paciencia, su apoyo incondicional, opiniones, críticas, sugerencias, correcciones, debates, entre muchos aspectos más que se involucraron en este trabajo.
- Al posgrado de Ciencias de la Información en brindarme la oportunidad de superarme, así como también a los maestros que nos impartieron clases y nos asesoraron en las diversas temáticas.
- A las instituciones que me apoyaron y brindaron los espacios de trabajos para realizar mis estudios, la Facultad de Informática y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.
- A mis compañeros de generación: Cesar, Daniel, Edgar, Jorge, Marcia y Rosendo.
- Agradecimiento de antemano a todos los miembros del comité particular de este trabajo, asimismo a los sinodales: DR. Noel Bonfilio Pineda Jaimes y MC. Cesar Enrique Romero Higareda.
- Finalmente, agradezco al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONA-CyT), por su apoyo en modalidad de beca con el número CVU: 429231.

¡Muchas gracias!

Resumen

La desertificación es un problema de importancia global, ya que reduce la productividad y el valor de los suelos ocasionando un impacto sobre el territorio y su población. Dicho proceso es originado por diversos factores ambientales y antropogénicos, en el contexto de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Uno de las diversas técnicas de identificación de zonas con desertificación son aquellas que utilizan las Tecnologías de Información Geográfica (TIG). Las TIG ayudan a identificar zonas propensas a desertificación a través de indicadores geoespaciales y cuantitativos.

En esta investigación se plantea como objetivo desarrollar una propuesta metodológica que permita integrar diferentes variables obtenidas a partir de datos del sensor MODIS, cartografía temática e información estadística, para determinar zonas vulnerables a desertificación. Dentro de estas variables seleccionadas se tiene: aumento de albedo; disminución de biomasa; deforestación; zonas con escasa vegetación y con vegetación (cubierta vegetal); contenido de humedad en el suelo; precipitación; temperatura superficial; y las distancias de asentamientos humanos, zonas agrícolas, redes hidrológicas, zonas con degradación física y química, zonas con erosión hídrica y eólica.

Para la integración de las dichas variables se definieron cinco criterios (Ambiental, Antropogénicos, Humedad, Suelo y Vegetación), los cuales contienen en su mayoría tres factores. La ponderación de los criterios y factores se realizó mediante el método de comparación por pares de Saaty, para posteriormente obtener el peso final de cada factor mediante el método de jerarquías analíticas. Finalmente, se aplicó una sumatoria lineal ponderada para obtener un mapa denominado índice de zonas propensas a desertificación (IZPD).

La validación de los resultados (IZPD) se llevó a cabo utilizando mapas de uso de suelo y vegetación, climas y humedad, índice de aridez y degradación de suelos. Los resultados obtenidos mostraron valores más altos del IZPD en la zona norte del Estado y más bajos en la zona sur, observándose una clara zona de transición en la parte central del Estado.

Abstract

Desertification is a world-wide problem because it reduces the value and soil's productivity causing an impact on the territory and population. This process is caused by various environmental and anthropogenic factors in the context of dry weather. A technique to identify desertification areas is the use of Geographical Information Technologies (GIT). GIT's allow straightforward desertification area recognition through geospatial and quantitative indicators.

This research therefore seeks to develop a methodological proposal for integrating different variables obtained from MODIS data, thematic mapping and statistical information to determine areas vulnerable to desertification. The variables are: increased albedo; reduce biomass, deforestation, sparsely vegetated areas; vegetated areas (green cover); moisture content in the soil; precipitation; surface temperature; and the distances of human settlement, areas agricultural, hydrological networks, areas with physical and chemical degradation, areas with water and wind erosion.

The integration of these variables are classified into five criteria (environmental, anthropogenic, humidity, soil and vegetation), which contain mostly three factors. The weighting of the criteria and factors was performed by the Saaty's method of pairwise comparison, later to obtain the final weight of each factor by the method of analytic hierarchies. Finally, a weighted linear summation was applied to obtain a map called index areas prone to desertification (IZPD).

The validation of the results (IZPD) was held using maps of: land use and vegetation; climate and humidity; aridity and land degradation. The results showed, higher values of IZPD, in the northern and lowest values in the south, showing a clear transition zone in the central part of the state.

Índice general

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract.....	IV
Índice de figuras.....	IX
Índice de Tablas.....	XIII
Abreviaturas y Acrónimos	XV
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento y Justificación del Problema	8
1.3. Hipótesis y Objetivos	10
Capítulo 2. Marco Teórico.....	12
2.1. Desertificación	12
2.1.1. Definición	12
2.1.2. Situación mundial.....	14
2.1.3. Problemática	16
2.1.4. Factores e Indicadores.....	17
2.1.5. Lucha contra la desertificación	25

2.2. Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica	27
2.2.1. Aplicación en la identificación y monitoreo de la desertificación	28
2.3. Sensor Espectroradiómetro para Imágenes de Resolución Moderada .	32
2.3.1. Especificaciones y características del sensor.....	33
2.3.2. Productos MODIS	33
2.3.3. Niveles de procesamiento de los datos MODIS	35
2.3.4. Producto MOD11: temperatura y emisividad de la superficie terrestre.....	36
2.3.5. Producto MCD12: cobertura de suelo y sus cambios	39
2.3.6. Producto MOD13: índice de vegetación	41
2.3.7. Producto MOD17: producción primaria y fotosíntesis neta	43
2.3.8. Producto MCD43: albedo	47
Capítulo 3. Propuesta Metodológica	51
3.1. Objeto de estudio: El territorio de Sinaloa.....	52
3.2. Datos y Metodología.....	54
3.2.1. Sumatoria lineal ponderada	54
3.2.2. Normalización	56
3.2.3. Ponderación de criterios y factores: análisis jerárquico	58
3.3. Obtención de variables	61
3.3.1. Procedimiento para generar las variables del sensor MODIS	61

3.3.2. Procedimiento para generar variables de origen temático	63
3.3.3. Procedimiento para generar variables geoestadísticos	64
3.3.4. Procedimiento de los factores	65
3.3.5. Filtro de cuadro adaptable.....	73
3.4. Validación de resultados.....	74
3.4.1. Validación con mapas de uso de suelo y vegetación e índice de vegetación.....	75
3.4.2. Validación con mapas de climas	75
3.4.3. Validación con mapas de aridez.....	75
3.4.4. Validación con mapa de intensidad de degradación.....	76
Capítulo 4. Resultados	77
4.1. Variables y factores generados	77
4.1.1. Máscara de restricción.....	77
4.1.2. Criterio ambiental	78
4.1.3. Criterio antropogénico	83
4.1.4. Criterio de humedad de suelo	87
4.1.5. Criterio de suelos	91
4.1.6. Criterio de vegetación	94
4.2. Correlación de factores.....	98
4.2.1. Correlación del año 2003	98

4.2.2. Correlación del año 2012	99
4.3. Ponderación	102
4.4. Evaluación multicriterio: índice de zonas propensas a desertificación	103
4.4.1. Validación	107
4.4.2. Zonas propensas a desertificación a nivel municipal	111
Capítulo 5. Conclusiones	115
5.1. Líneas futuras de investigación	118
Anexo.....	119
A. Factores e indicadores que inciden en la desertificación.....	119
Factores naturales	119
Factores antropogénicos.....	119
Factores sociales	120
Factores económicos	120
B. Datos de precipitación.....	121
Bibliografía.....	125

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de las principales zonas vulnerables a la desertificación por erosión en 1981.	2
Figura 2. Mapa de vulnerabilidad global de México a la desertificación 1995.	3
Figura 3. Mapa global de vulnerabilidad de desertificación.....	4
Figura 4. Mapas de las principales causas de la degradación de suelos en México. ..	6
Figura 5. Diagrama de relaciones del modelo de Presión-Estado-Respuesta.	19
Figura 6. Retícula sinusoidal del sensor MODIS.....	34
Figura 7. Esquema metodológico.	51
Figura 8. Mapa del área de estudio correspondiente al Estado de Sinaloa, México. Elaboración propia.	52
Figura 9. Escala de medida para la asignación de juicios del método de comparación por pares de Saaty.....	58
Figura 10. Esquema metodológico para factores de MODIS.	61
Figura 11. Ejemplo de proyección sinusoidal a proyección UTM-13N de la variable índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI), año 2012.....	63
Figura 12. Mapa de restricción en el área de estudio.	77
Figura 13. Mapas de aumento de albedo en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	78
Figura 14. Factores de aumento de albedo en los años 2003 y 2012.....	79

Figura 15. Mapas de disminución de biomasa en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	80
Figura 16. Factores de disminución de biomasa en los años 2003 y 2012.	81
Figura 17. Mapas de temperaturas en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	82
Figura 18. Factores de temperaturas en los años 2003 y 2012.	82
Figura 19. Mapa de distancias cercanas a carreteras en el Estado de Sinaloa.	83
Figura 20. Mapas de distancias cercanas a asentamientos humanos en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	84
Figura 21. Mapas de distancias cercanas a zonas agrícolas en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	84
Figura 22. Factor de distancias cercanas a carreteras en el Estado de Sinaloa.	85
Figura 23. Factores de distancias cercanas a asentamientos humanos en los años 2003 y 2012.	86
Figura 24. Factores de distancias cercanas a zonas agrícolas en los años 2003 y 2012.	86
Figura 25. Mapa de contenido de humedad en el suelo en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 26. Factores de contenido de humedad en el suelo (TVDI) en los años 2003 y 2012.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 27. Mapas de precipitación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.	89
Figura 28. Factores de precipitación en los años 2003 y 2012.	90

Figura 29. Mapa de distancias cercanas a redes hidrológicas en el Estado de Sinaloa y su factor.....	91
Figura 30. Mapa de zonas cercanas a degradación física en el Estado de Sinaloa y su factor.	92
Figura 31. Mapa de zonas cercanas a degradación química en el Estado de Sinaloa y su factor.....	92
Figura 32. Mapa de zonas cercanas a erosión eólica en el Estado de Sinaloa y su factor.....	93
Figura 33. Mapa de zonas cercanas a erosiona hídrica en el Estado de Sinaloa y su factor.....	93
Figura 34. Mapas de cubierta vegetal en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.....	94
Figura 35. Mapas de escasa vegetación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.....	95
Figura 36. Factores de cubierta vegetal en los años 2003 y 2012.....	96
Figura 37. . Factores de escasa vegetación en los años 2003 y 2012.....	96
Figura 38. Mapas de deforestación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.....	97
Figura 39. Factores de deforestación en los años 2003 y 2012.....	98
Figura 40 . Pesos finales de los factores.....	103
Figura 41. Histogramas de los resultados de la evaluación multicritero.....	104

Figura 42. Mapa del índice de zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa en el año 2003.....	105
Figura 43. Mapa del índice de zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa en el año 2012.....	106
Figura 44. Resultados de la regresión lineal en el <i>software</i> IDRISI para el caso de índice de zonas propensas a desertificación y NDVI (Izquierda año 2003, derecha año 2012).	108
Figura 45. Mapas de zonas climáticas por el índice de DeMartonne en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.....	110
Figura 46. Resultados de la regresión lineal en el <i>software</i> IDR para el caso de índice de zonas propensas a desertificación y el índice de DeMartonne.	110
Figura 47. Mapa de valores medios del IZPD a nivel municipal en el año 2003.	112
Figura 48. Mapa de valores medios del IZPD a nivel municipal en el año 2012.	113
Figura 49. Discretización de los valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en tres niveles en los años 2003 y 2012.	114

Índice de Tablas

Tabla 1. Subproductos de MOD11 y características.....	39
Tabla 2. Subproductos de MCD12 y características ¹	40
Tabla 3. Subproductos de MOD13 y características.....	43
Tabla 4. Subproductos de MOD17 y características.....	44
Tabla 5. Coeficientes del polinomio para black-sky albedo y white-sky albedo.....	49
Tabla 6. Subproductos de MOD43 y características.....	50
Tabla 7. Superficie de Sinaloa por tipo de clima.....	53
Tabla 8. Jerarquía entre criterios y factores.....	55
Tabla 9. Normalización de variables.....	57
Tabla 10. Jerarquía de importancia de los criterios.	58
Tabla 11. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio ambiental.....	59
Tabla 12. Jerarquía de importancia de los factores antropogénicos.	59
Tabla 13. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio climático.	59
Tabla 14. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio de suelo.....	60
Tabla 15. Jerárquica de importancia de los factores en el criterio de vegetación.	60
Tabla 16. Productos utilizados del sensor MODIS.....	61
Tabla 17. Factores obtenidos de INEGI.....	63

Tabla 18. Matriz de correlación lineal de Pearson momento-producto entre los factores en el año 2003.	100
Tabla 19. Matriz de correlación lineal de Pearson producto-momento entre los factores en el año 2012.	101
Tabla 20. Ponderación de criterios y factores.	102
Tabla 21. Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en las cubiertas de uso de suelo del producto MCD12Q1.....	107
Tabla 22. Valores medios del índice de zonas propensa a desertificación en los tipos de climas.	109
Tabla 23. Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación con intensidades de degradación.....	111
Tabla 24. Estaciones meteorológicas y precipitación acumulada (2003)	121
Tabla 25. Estaciones meteorológicas y precipitación acumulada (2012).	123

Abreviaturas y Acrónimos

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
APAR	Radiación Fotosintética Activa Absorbida – <i>Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i> .
BPLUT	Tabla de Parámetros de Búsqueda de Biomas – <i>Biome Parameter Lookup Table</i> .
BRDF	Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional.
CNULD	Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación.
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad.
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal.
CONAZA	Comisión Nacional de las Zonas Áridas.
DAO	<i>Data Assimilation Office</i> .
DBMS	Sistemas Gestores de Base de Datos – <i>DataBase Management Systems</i> .
DPSIR	Fuerza Propulsora, Presión, Estado, Impacto y Respuesta.
EOS	<i>Earth Observing Systems</i> .
EOSDIS	<i>Earth Observing Systems - Data Information System</i> .
EVI	Índice de Vegetación Mejorado – <i>Enhanced Vegetation Index</i> .
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido.
FPAR	Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa – <i>Fraction of Photosynthetically Active Radiation</i> .
GPP	Productividad Primaria Bruta – <i>Gross Primary Production</i> .
HDF-EOS	<i>Hierarchical Data Format - Earth Observing Systems</i> .
IGBP	Programa Internacional Geosfera-Biofera
INCD	Comité de Negociación Intergubernamental.
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

IZPD	Índice de Zonas Propensas a Desertificación.
LAI	Índice de Área Foliar – <i>Leaf Area Index</i> .
MSDI	Índice de Desviación Estándar Dinámico.
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> .
NPP	Producción Primaria Neta – <i>Net Primary Production</i> .
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
PS	Presión-Estado.
PSR	Presión-Estado-Respuesta.
RIOD-MEX	Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y Degradación de los Recursos Naturales.
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
SKDBRM	<i>Semiempirical Kernel-Driven Bidirectional Reflectance Model</i> .
TDRSS	<i>Tracking and Data Relay Satellite Systems</i> .
TIG	Tecnologías de la Información Geográfica.
TVDI	Índice de Sequedad Temperatura Vegetación – <i>Temperature Vegetation Dryness Index</i> .
UACH	Universidad Autónoma de Chapingo.
UMD	Universidad de Maryland.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

En 1949, el vocablo de desertificación apareció publicado en el libro “*Clima, Bosques y Desertificación en el África Tropical (Climats, Forêts et Désertification de l'Afrique Tropicale)*”, de Aubreville ^[19,32,87]. Según Glantz y Orlovsky (1983) ^[32], Aubreville describe a la desertificación como un proceso pero también se refirió a éste como un evento (fase final del proceso de degradación).

Durante la década de 1970, se produjo un crecimiento de la conciencia pública y del conocimiento científico en el campo medioambiental, posibilitando la convergencia de ambos y dando una respuesta política nacional e internacional a un problema de dimensiones mundiales ^[19]. En consecuencia, en el año 1977, se celebró la primera *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desertificación*, en Nairobi, Kenia; donde se incluyó la cuestión de desertificación como problema global en la agenda internacional ^[19,34,80]. Además, como resultado de dicho evento, se elaboró conjuntamente el primer mapa mundial sobre la desertificación por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ^[15]. Asimismo, se desarrolla en paralelo una discusión sobre las causas, las dinámicas y el concepto de desertificación ^[80].

En México en 1991, la Comisión Nacional de Ecología (CNE), presentó un dictamen con información cuantitativa y cualitativa sobre la desertificación, incluyendo un mapa de 1981, ilustrando las principales zonas afectadas por éste proceso, elaborado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), tomando como base criterios topográficos, erosión, precipitación y aptitud del suelo para agricultura y ganadería. En dicho trabajo, se destaca la cordillera neovolcánica como la zona más vulnerable a la desertificación, debido a la elevada erosión, salinización y alcalinización (Figura 1) ^[14].

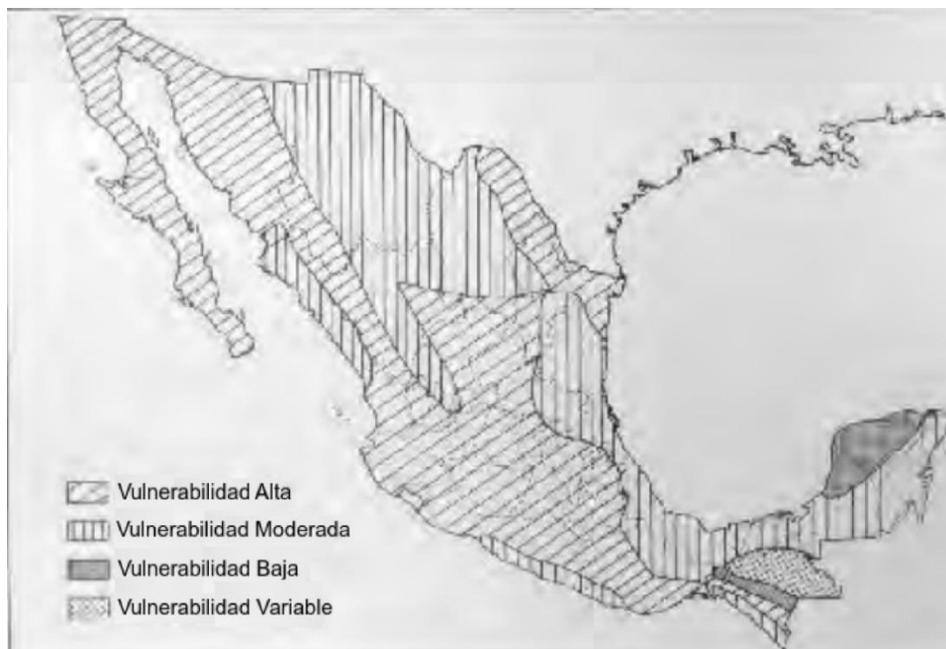


Figura 1. Mapa de las principales zonas vulnerables a la desertificación por erosión en 1981. Fuente: CNE (1991) ^[14].

En 1992, se realizó la Conferencia del Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en Río de Janeiro, Brasil, creando el Comité de Negociación Intergubernamental (INCED), cuyo objetivo era empezar a desarrollar un marco internacional para tratar la desertificación, dando origen a la “Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación” (CNULD) ^[16,34,39,46]. Los resultados de la convención son la publicación de la primera edición del *Atlas Mundial de la Desertificación* ^[15] y el producto denominado Agenda 21 ^[80].

El 17 de Junio de 1994 se firmó el marco denominado CNULD en París, Francia, y rectificado en el 26 de diciembre de 1996, siendo México uno de los principales países en rectificar su participación en la lucha contra la desertificación; además, se proclamó el 17 de Junio como Día Mundial de Lucha Contra la Desertificación y Sequía ^[10,16,27,34,46].

De acuerdo con diversos autores ^[10,16,27,34,46], la lucha contra la desertificación es un objetivo prioritario, jurídicamente obligatorio, con aplicación en todo el territorio nacional, por lo que se han realizado cientos de actividades y formación de organismos, entre los que se encuentra la Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CO-

NAZA), formada en 1970, la cual en 1994 formuló en conjunto con 32 instituciones una guía de Plan de Acción de Combate a la Desertificación.

El 1 de Junio de 1995, mediante un decreto que se promulgó en el Diario Oficial de la Federación, México corroboró su adhesión a la CNUCLD. No obstante fue hasta principios de 1999 cuando se entendió que la desertificación es la degradación de los suelos de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores naturales y antropogénicos ^[98]. Asimismo, el Instituto Nacional de Ecología (INE) estimó para el año de 1995, que el 96.98% del territorio nacional como vulnerable a la desertificación en distintos grados (Figura 2) ^[76].



Figura 2. Mapa de vulnerabilidad global de México a la desertificación 1995. Fuente: Oropeza Orozco (2004) ^[76].

En 1997, surge la Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (RIOD-Mex), que agrupan a 46 organizaciones no gubernamentales, organizaciones de productores y representantes del sector académico, con el fin de promover la participación ciudadana en el combate contra la desertificación a través de la difusión de información y realización de actividades ^[98].

En 1998, el departamento de agricultura de Estados Unidos, elaboró un mapa mundial de vulnerabilidad de desertificación a nivel mundial (Figura 3). Gran parte

del territorio de México, es considerado con cierto grado de vulnerabilidad a desertificación. Por otro lado, dentro de las zonas consideradas con este problema, la mayor extensión es considerada con vulnerabilidad media. Asimismo, analizando el Estado de Sinaloa, presenta vulnerabilidades muy altas hacia el norte, y moderadas hacia el sur [74].

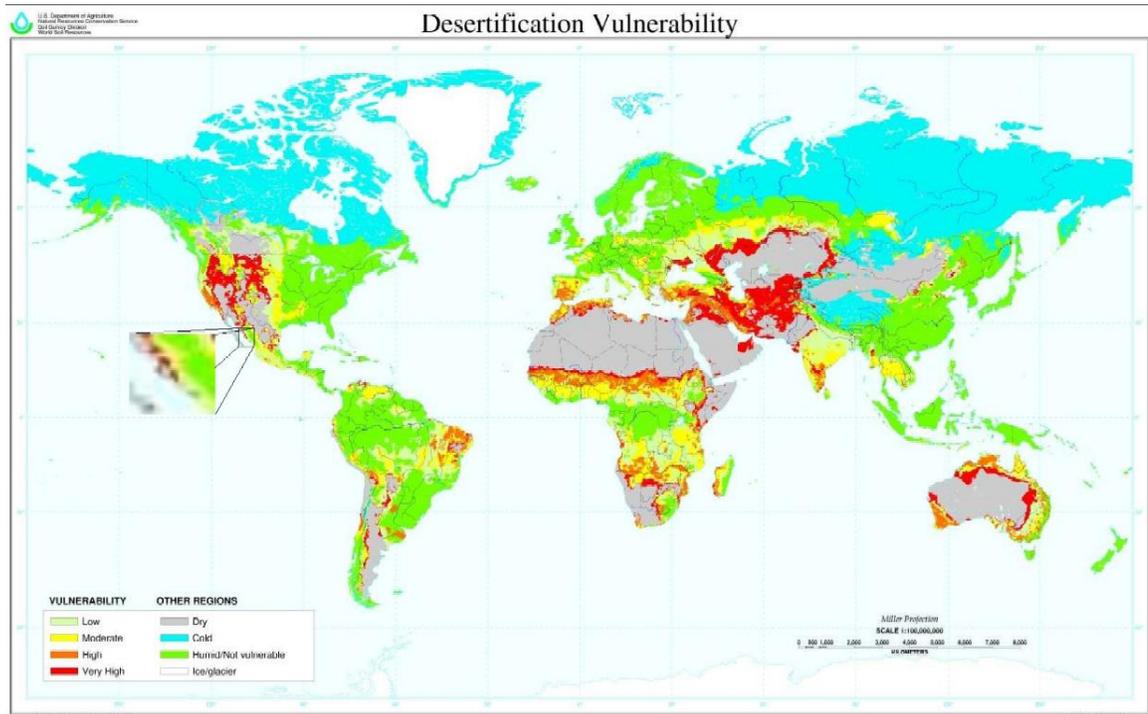


Figura 3. Mapa global de vulnerabilidad de desertificación. Fuente: NRCS (2003) [74].

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en 1997 elaboró un mapa de “Evaluación de la degradación del suelo a escala de 1:4,000,00”; el cual serviría de base para realizar una evaluación más detallada a una escala 1:1,000,000 en el año 1999, utilizando la metodología GLASOD (*Global Assessment of Human-induced Soil Degradation*). Para realizar dicha evaluación, se dividió el país en unidades fisiográficas homogéneas (topografía, clima, vegetación, geología, suelo y uso del suelo), donde cada unidad fue visitada y se evaluó el tipo e intensidad de la degradación del suelo visualmente, estimando el porcentaje de la unidad en condiciones de degradación. Los resultados estimados mostraron que en 64.03% del país se presentaban o se encontraban áreas de influencia de procesos

de degradación en 1999. No obstante la escala de trabajo no era adecuada para la planificación de estrategias y diseños de programas de manejos de recuperación de los suelos. En consecuencia, en el año 2001, se llevó a cabo el proyecto “*Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la república mexicana a escala 1:250,000*”, como parte del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2000-2006 que realizó SEMARNAT en colaboración con el Colegio de Postgraduados. Éste estudio consistió en una valoración directa de los suelos de México en campo basándose en la metodología ASSOD (*Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation*), considerando como tipo de degradación: erosión hídrica y eólica (perdida de suelos, deformación del terreno), degradación química (pérdida de fertilidad, contaminación, salinización), degradación física (compactación, encostramiento, anegamiento, pérdida de la función productiva, disminución de la disponibilidad de agua). Además, se consideraron terrenos sin degradación aparente (terrenos estables bajo condiciones naturales y bajo influencia humana, terrenos sin uso como desiertos, regiones áridas montañosas, afloramientos rocosos, dunas costeras y planicies salinas). También, se incluyeron las causas principales como actividades agrícolas, deforestación y remoción de la vegetación, sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico, sobrepastoreo, actividades industriales (minas, desfogue de industrias, aguas residuales, derrames de petróleos y basureros) y urbanización. Por último, se consideraron cuatro niveles de afectación de la degradación del suelo: ligeros, moderados, fuertes y extremos. Como resultados se obtuvo que la superficie afectada por algún tipo de degradación representaba el 45% del territorio nacional (Figura 4); el total de las tierras secas del país presentaban algún grado de degradación: 32.4% en zonas semiáridas, 26.1% en zonas subhúmedas, 22.4% en zonas áridas y 19.1% en zonas muy áridas ^[76,99,101,107].

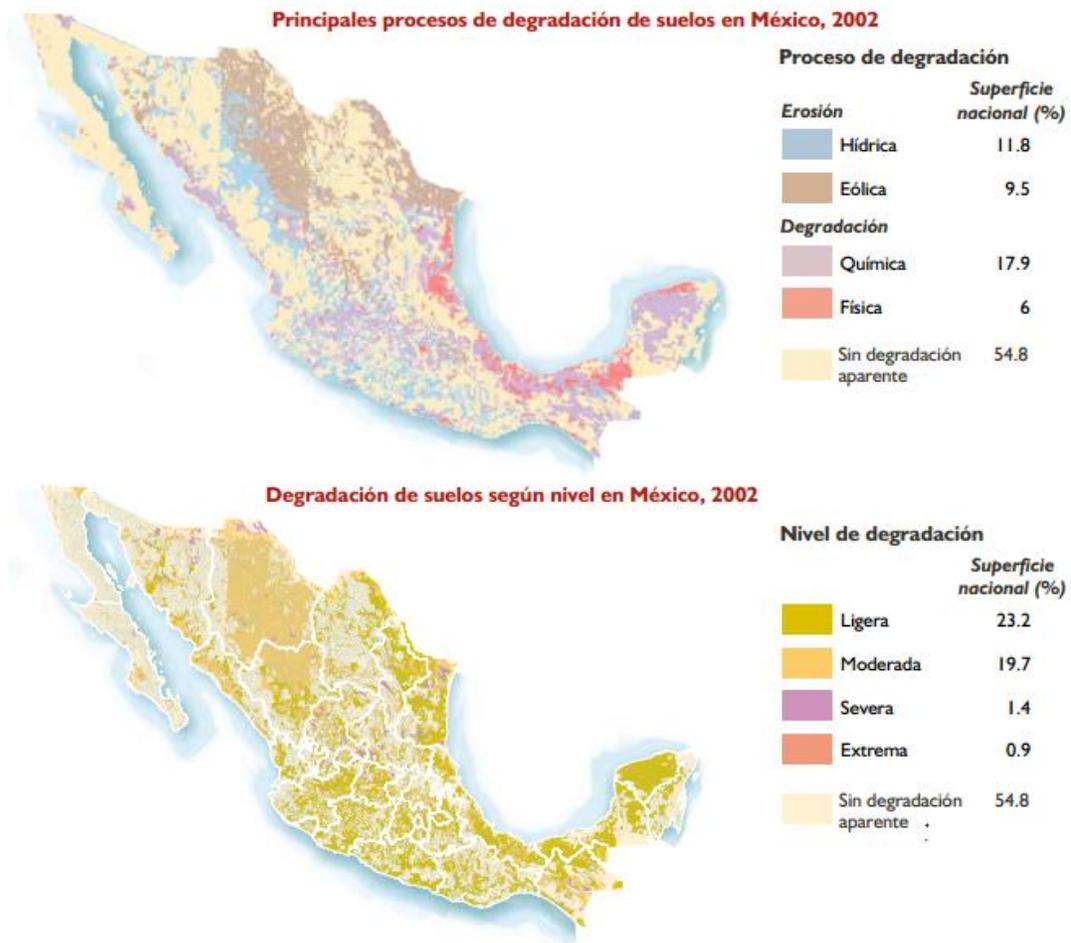


Figura 4. Mapas de las principales causas de la degradación de suelos en México. Fuente: SEMARNAT (2009) ^[102].

Para el año 2005, México conformó un Sistema de Lucha Contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (SINADES), integrado por distintas dependencias del sector público, social y académico, entre ellos: Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y Degradación de los Recursos Naturales (RIOD-MEX), Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) y Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), fungiendo ésta última como coordinador del sistema y representante nacional ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación ^[102].

En el año de 2006, se consideró como el año internacional de los desiertos y la desertificación, con el propósito de sensibilizar al público sobre éste problema y ayudar a proteger la biodiversidad de tierras áridas ^[1,3,34,97]. Asimismo, el 16 de Agosto de 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el periodo 2010-2020 como el Decenio de las Naciones Unidas para los Desiertos y la Lucha Contra la Desertificación^[39].

No obstante, para el caso de México, según SEMARNAT para el año 2008 no existían estudios específicos sobre la extensión de la desertificación a nivel nacional, pero se tenía una idea de la magnitud de ésta considerando la degradación del suelo en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas ^[101].

Al respecto, como contraparte, los académicos y científicos han realizado diversos trabajos de investigación sobre la desertificación en México. Hernández *et al.* (2009)^[46], realizó un estudio del territorio nacional sobre desertificación, a partir de cartas de climas obtenidas del portal de CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad), a escala 1:1,000,000 del año 1998. Los resultados presentados mencionan que el 31.5% del territorio nacional presenta algún grado a desertificación, causado principalmente por la erosión eólica e hídrica y la degradación física y química. Además, se incluye información sobre la afectación en el Estado de Sinaloa en 3 distintos grados de intensidad (ligero, moderado, extremo), afectando el 44.52% del total de la superficie.

Existen trabajos para regiones más específicas en el territorio nacional, tal es el caso del estudio de Solís y Vázquez (s/f)^[107], realizado en Baja California Sur utilizando como indicadores de estudio la aridez, pendiente, orientaciones, texturas de suelo, coberturas vegetales, degradación y erosión de suelos, condiciones de los acuíferos, pastoreo, caminos, zonas agrícolas, zonas urbanas y áreas naturales protegidas; y para la integración de los factores un modelo multicriterio en donde cada identificador fue estandarizado, priorizado y ponderado, conforme a la comparación por pares de Saaty y siguiendo el método del análisis jerárquico (AHP).

Otro estudio, realizado en Cuatro Ciénegas, Coahuila por Madrigal y López (2009)^[63], utilizan imágenes del sensor Landsat ETM+ para obtener los indicadores

de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Desviación Estándar Dinámico (MSDI) y el albedo, integrando todas las variables el método de clasificación de árbol de decisión. También, se realizó una evaluación de los procesos de desertificación para una cuenca en el Noreste de México considerando solamente como indicador la erosión hídrica por Pando *et al.* (2002) ^[78]. Por último, se tiene el trabajo realizado por Norzagaray *et al.* (2011) ^[73], en el municipio de Guasave, Sinaloa, utilizando como indicadores las variables de: pH (potencial de Hidrogeniones), densidad aparente y real, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y los niveles de concentración de aluminio, cloruro, fierro, magnesio y manganeso; y como técnica las series de Fourier para obtener sus respectivos espectro de potencia y radial.

1.2. Planteamiento y Justificación del Problema

A nivel mundial se han seguido políticas de desarrollo en las que no se consideran los efectos e impacto sobre el medio ambiente ^[104]. Actualmente se considera que una de las mayores amenazas medioambientales a escala mundial es la desertificación, presente, principalmente, en las zonas áridas de los 5 continentes ^[36].

La desertificación es un fenómeno global que afecta aproximadamente un 40% de la superficie terrestre de nuestro planeta. Asimismo, una superficie de 36 millones de km², equivalente a un 70% de las tierras áridas, está siendo afectada por este problema ^[48]. En los inicios de la década del 2000 le costaba al mundo \$42,000 millones de dólares anuales, afectando a 1,000 millones de personas ^[26,36,48], actualmente el costo es de \$490 mil millones de dólares ^[111].

Este fenómeno tiene una gran importancia en los sistemas de producción agrícola, dado que si se presenta problemas de éste tipo en los suelos, termina siendo un proceso permanente y prácticamente irreversible por la pérdida total del potencial biológico en el suelo, mientras que la degradación de suelos, puede ser reversible y controlada ^[5].

México es uno de los países con más diversidad biológica del mundo, con una distribución de una gran variedad de ecosistemas que incluyen zonas marinas, cos-

terras, altas montañas, zonas áridas, bosques tropicales y desiertos ^[92]. Además, es uno de los principales países exportadores en la producción agrícola, tanto en los sistemas de agricultura convencional como los sistemas orgánicos ^[60].

Sin embargo, debido a la obtención de recursos naturales, se ha generado una alteración y deterioro ambiental provocando problemas que impactan en la pérdida de biodiversidad, alteración del ciclo del agua, degradaciones de suelos, cambios climáticos, etc. ^[98]. Aunado a esto, el uso excesivo de agroquímicos sintéticos ha perjudicado el medio ambiente, contaminando, degradando y perdiendo la microflora y microfauna de los suelos ^[60].

Lo anterior ha provocado que en la mayor parte del territorio nacional existan zonas que presenten degradación, debido a procesos de deforestación asociados a cambios de uso del suelo (principalmente hacia el uso agropecuario) ^[98]. Asimismo, la contaminación del suelo da las pautas para la desertificación, que durante su proceso influye en la disminución de la producción de alimentos en las áreas afectadas dando origen también a la degradación del suelo ^[46,76]. Ante esto, actualmente 1 de cada 10 hectáreas de la superficie del país padecen o son susceptibles a tener un grado de degradación de suelo ^[16].

Existen estrategias que permiten utilizarse como medidas preventivas que pueden consistir en: gestión de las tierras y de los recursos hídricos para la protección del suelo por la erosión, control de la salinización, protección de la cubierta vegetal, protección del suelo contra las erosiones hídricas y eólicas, combinación de métodos tradicionales con nuevas tecnologías sustentables para la explotación del suelo. Entre las medidas de recuperación de suelos afectados que pueden ser de ayuda se tienen: establecimiento de bancos de semillas, el reabastecimiento de materia orgánica y microorganismos al suelo, establecimiento de especies determinadas, prácticas agrícolas que disminuyan la erosión del suelo, control de especies dañinas, reposición de nutrientes químicos y orgánicos al suelo y, principalmente, la reforestación en altas densidades ^[35]. Dichas estrategias permiten ayudar a las comunidades afectadas, en una primera instancia a mejorar el hábitat y en segundo término a obtener ingresos en una forma de producción sustentable durante el pro-

ceso de recuperación. Los problemas ambientales generados por este tipo de procesos no pueden ser solucionados por medio de cambios arbitrarios, se necesitan implementar estrategias de abordaje integral que tomen en cuenta a toda la comunidad involucrada a través de estrategias y planes de desarrollo participativos ^[104].

Por otro lado, para poder identificar y combatir este fenómeno se requiere contar con estudios o inventarios donde se ubiquen geoespacialmente las áreas vulnerables a desertificación, aunadas a un estudio descriptivo sobre los factores que inciden directa e indirectamente en este fenómeno.

1.3. Hipótesis y Objetivos

La desertificación es un problema que ocasiona un grave impacto en la sustentabilidad del territorio tanto a nivel local, regional e internacional desde la perspectiva ambiental, económica y social. Para ello es necesario generar de forma geoespacial, cualitativa y cuantitativa, una cartografía digital de las zonas propensas a dichos procesos. Además, la posibilidad de su localización geográfica para poder tomar medidas preventivas antes que la afectación sea irreversible.

Ante esto se plantea en este trabajo la siguiente hipótesis: *La integración de variables geoespaciales (ambientales, actividades humanas, hidrológicos, accesibilidad, económicos, etc.) mediante Tecnologías de la Información Geográfica (Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica) permitirá determinar áreas propensas a desertificación.*

Para ello se propuso como objetivo principal:

- Desarrollar una propuesta metodológica para generar, integrar y modelar variables geoespaciales para determinar zonas propensas a desertificación.

Para alcanzar el objetivo principal y validar la hipótesis se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Integrar una base de datos geoespacial a partir de imágenes MODIS y cartografía temática.

- Modelar las variables geoespaciales mediante técnicas de análisis espacial.
- Diseñar la propuesta metodológica para obtener factores que indiquen las zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México.
- Obtener resultados para validar la propuesta metodológica.
- Validar los resultados de zonas propensas a desertificación.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Desertificación

La palabra “*Desertificación*” normalmente se asocia a la formación de desiertos, pero el problema no solo se relaciona con estos ecosistemas ^[1,19,26,34,48,70,84], es un concepto complejo, controvertido, con frecuencia utilizado en forma errónea, es difícil su conceptualización debido a lo impreciso de su significado, variando mucho según el grado de desarrollo de conocimiento científico, cultural, económico y social de las poblaciones afectadas ^[61]. Tras este término se establecen un conjunto de procesos que se interrelacionan entre sí, que se manifiestan a distintos niveles de resolución espacial y temporal, en diferentes aspectos físicos, biológicos, históricos, económicos, sociales, culturales y políticos ^[19].

La desertificación es un fenómeno complejo con mucha incertidumbre, siendo principalmente una consecuencia de la sobreexplotación que los grupos humanos hacen en las tierras áridas. Afectando distintos ambientes e involucrando factores interrelacionados ^[1,26,48,55,84,87,95].

Los ecosistemas que se pueden ver afectados por la desertificación comprenden desde los desiertos extremos (hiperárido) hasta los ecosistemas subhúmedos secos, es decir, las tierras secas son susceptibles a ser afectadas por este fenómeno, principalmente, en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, originado por variación climática y las actividades humanas donde el agua es el principal factor limitante de la productividad de los ecosistemas ^[3,5,16,18,95,124,130].

2.1.1. Definición

Existe una controversia de acuerdo con el concepto de desertificación, dado que tiene varias definiciones e interpretaciones que revelan la complejidad de los factores que en ella intervienen, difícilmente sintetizados en un simple concepto ^[6,105].

Inicialmente la desertificación había sido interpretada como el cambio de producción de tierras a desiertos, causados por el ser humano, sin embargo, esta interpretación es errónea [3]. Holtz (2003) ^[48], menciona que la Organización de las Naciones Unidas (ONU), definen a la desertificación como: *“La disminución, deterioro o destrucción del potencial biológico del suelo, que en sus últimas instancias puede conducir a condiciones de desierto”*. Otra definición citada en López (2006) ^[61], por FAO es: *“El conjunto de factores geológicos, climáticos, biológicos y humanos provocan la degradación del potencial físico, químico y biológico de las tierras secas de las zonas áridas y semiáridas poniendo en peligro la biodiversidad y la supervivencia de las comunidades humanas”*.

El organismo creado por la ONU para este problema (CNUCLD) define a la desertificación como: *“Un proceso complejo de degradación de tierras que reduce la productividad y el valor de los suelos y recursos naturales en tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas causados principalmente por actividades humanas y variaciones climáticas”* ^[3,17-19,23,34,61,62,112].

Asimismo, diferentes autores hacen mención sobre su propia definición de desertificación integrando principalmente lo siguiente: *La desertificación es un proceso complejo que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales, produciendo una degradación de las tierras y de la vegetación, la erosión de los suelos, la pérdida de la capa superficial del suelo y de las tierras fértiles en el contexto de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultados de variaciones climáticas y, principalmente, por las actividades humanas* ^[19,25,48,57,61,62,70].

En el término de desertificación y degradación existe una gran controversia ^[44]. La degradación de suelos se emplea muchas veces como sinónimo de desertificación, aunque éste término es más amplio que desertificación ^[70]. Además cabe mencionar que la desertificación y la degradación de los suelos no son procesos repentinos sino graduales, aunque sus síntomas son similares ^[48].

Es por ello que en algunos países como Argentina y Colombia, se optó el término de desertificación a la degradación de suelos. En otros lugares se emplean

ambas para describir el mismo proceso, considerando políticas públicas y las prioridades que cada país determina en este ámbito ^[17]. Algunos autores consideran la desertificación como la última instancia de la degradación de los suelos en ambientes secos ^[1,39,57,71,95,112].

Por su parte la degradación conduce a una disminución significativa de su capacidad productiva de los suelos ^[17,112]. En la producción agrícola la degradación puede ser reversible y un proceso controlado, mientras que la desertificación es permanente y prácticamente irreversible con casi una pérdida total de su potencial biológico ^[5]. Disminuir y detener el aumento de la degradación y desertificación, en términos de costo, es más eficaz que remediar sus consecuencias medioambientales, sociales y económicas ^[48].

En este sentido, no es un problema meteorológico o ambiental aislado (ejemplo: las sequías) en un territorio más o menos extenso, sino una patología surgida de la ruptura del equilibrio entre los sistema de producción de los ecosistemas naturales y la explotación humana, perdiendo todo el potencial biológico de los ecosistemas afectados; en otras palabras, la desertificación es el estado irreversible de los procesos de degradación de los suelos ^[1,19,57,95].

2.1.2. Situación mundial

La desertificación es de los procesos a nivel mundial con mayores impactos medioambientales, sociales y económicos, y un tema de investigación preponderante en estudios de cambio climáticos, así como discusión y negociaciones internacionales sobre el medio ambiente y desarrollo sostenible desde hace más de dos décadas, declarada como una patología, es decir, una enfermedad ambiental compleja ^[19,26,57,61,84].

Estudios realizados afirman que gran parte de nuestro planeta se ve afectado por procesos de desertificación, ya que un 40% de la masa terrestre corresponde a tierras áridas, lo que de alguna manera contribuye a que la desertificación afecte aproximadamente la cuarta parte del mundo ^[48,61,87,97], ocasionando que más de 250

millones de personas sean afectadas directamente y aproximadamente entre mil millones a 6 mil millones de personas se encuentran en riesgo ^[23,124].

A principio de la década del 2000, un 70% de tierras áridas estaban afectadas por procesos de desertificación, afectando a más de 1,000 millones de personas en el mundo, con una pérdida de ingresos en las áreas afectadas de aproximadamente 42,000 millones de dólares anuales solo en el sector agrícola, estimando que un poco más de 100 países presentan riesgos o ya se encuentran afectados por la desertificación ^[26,34,44,47,48,61,97,112]. Actualmente de acuerdo con un boletín de CNUCLD, la degradación de las tierras está costando 490 mil millones de dólares anuales afectando a 168 países ^[111].

Asimismo, más del 50% de los ecosistemas naturales han sido alterados por el hombre, convirtiéndolos en superficies agropecuarias y artificiales ^[47,112], de tal manera que aproximadamente entre 5 y 10 millones de hectáreas se ven afectadas anualmente por la desertificación ^[5,15].

En cuanto a la afectación por continente, se puede señalar que África alberga el 37% de las zonas áridas del planeta, ya que dos terceras partes de la superficie total están constituidas de desiertos y zonas áridas, un 73% de las tierras áridas se encuentran graves o moderadamente degradadas, afectando cerca de la mitad de la población ^[26,48,97].

En los países africanos asentados en tierras áridas, la desertificación ocasiona la muerte a centenares de miles de personas, ya que ésta guarda una estrecha relación con la pobreza, migración y problemas de seguridad alimentaria ^[61,97]. Asimismo, la pérdida de la cubierta vegetal ha expuesto cerca del 25% del territorio a la erosión eólica y el 46% es vulnerable a la desertificación siendo el 55% considerados en un riesgo alto y muy alto a presentar este proceso ^[85,112].

Por su parte, en el continente asiático los efectos de la desertificación son graves dado que contiene el 33% de las zonas áridas del mundo ^[26]. En la década del 2000, de los 1,977 millones de hectáreas de tierras áridas en Asia, más de la mitad se encontraban en procesos de desertificación, el 13% de los suelos estaban degradados ^[112].

Por otro lado, gran extensión de las tierras del Mediterráneo actualmente son propensas a desertificación, siendo España, Portugal, Grecia e Italia, los países más afectados con aproximadamente el 60% de sus paisajes. En los países de Europa Central y Oriental, entre un 40% y 80% de las tierras áridas están fuertemente degradadas ^[26,48,61].

En el caso de la superficie de América Latina y el Caribe está compuesta por zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, presentando problemas de degradación el 75% de la superficie, estimando que 250 millones de hectáreas se ven afectadas en América del Sur y aproximadamente 63 millones de hectáreas en Centroamérica. En Norte América presenta un 30% de su territorio impactado por este proceso ^[70,97].

2.1.3. Problemática

La desertificación está relacionada directamente con el suelo. Los suelos son una de las bases naturales de la vida humana y desarrollo social y del funcionamiento básico de cualquier ecosistema ^[48].

La problemática de la desertificación es la afectación en los recursos vitales del suelo, agua y vegetación, ocasionando la ruptura del equilibrio de los ecosistemas y de los procesos físicos, químicos y biológicos, provocando una serie de fenómenos autodestructivos de todos los elementos que antes favorecían los procesos vitales ^[26,61], siendo un proceso más grave en donde la formación del suelo es un proceso lento y complejo de descomposición de las rocas ^[16,39].

El suelo es la capa superficial de la Tierra, teniendo como función ambiental la base de sustentabilidad y equilibrio de los ecosistemas, conteniendo materia orgánica y capacidad de albergar procesos biológicos, además constituyen un componente fundamental en el aspecto económico y de sustentabilidad humana (producción de alimentos), donde el 75% de los países dependen principalmente de la agricultura para sobrevivir. Sin embargo, existen diversos procesos naturales que afectan a los suelos como lo son la degradación y erosión que reducen la calidad del mismo, e incluso lo conducen a un estado avanzado que puede llevar la pérdida completa

(desertificación). Además induce indirectamente en otras áreas no afectadas como: crecidas de ríos y/o arroyos, salinización de los suelos, deterioro de la calidad de agua o deposición de lodos en los ríos, arroyos y embalses, también produce o agrava la hambruna, la malnutrición, la pobreza y los movimientos migratorios desencadenando crisis, conflictos e inestabilidad [16,48,71].

2.1.4. Factores e Indicadores

La desertificación es causada por un gran número de factores directos e indirectos conectados a la degradación de un ecosistema. Se puede presentar sin que el ser humano se vea involucrado, es decir, como un proceso natural. Las causas difieren en gran medida en las características de las regiones y las condiciones socio-económicas lo que impide una identificación exacta, cuanto más subdesarrollado es un país y más pobre su población, más graves serán los efectos. Existen muchos factores que contribuyen al fenómeno, como resultado de complejas interacciones entre varios factores de procedencia de suelos, vegetación, clima, demografía y de actividades humanas, teniendo un papel determinante distinto a un nivel que aún no están definidas específicamente dada a la falta de métodos de evaluaciones coherentes y cuantitativos en estudios multidisciplinarios [61,70,84,86,105,124].

Para definir o determinar el problema de desertificación no solo son necesarios conocer los factores que inciden, sino también se requieren de indicadores, parámetros, o medidas que permitan acercarse más a la realidad del proceso.

Zucca *et al.* (2011) [130], define un indicador como: “*un parámetro, o un valor derivado de parámetros, cuyo objetivo es proveer de información y descripción relacionado con el estado del fenómeno, con un significado que se extiende más allá directamente asociado con cualquier valor, el parámetro es una propiedad que es medida u observada*”.

Para la selección de indicadores es necesario establecer criterios conceptuales para delimitar las medidas, cumpliendo una serie de requisitos. Además de adoptar opciones metodológicas donde los indicadores deben de describir el resultado final y no algún producto intermedio. Asimismo se basan en la selección de la

existencia de datos, que expresen directamente lo que con ellos se quiere significar, en consecuencia, la propuesta de indicadores finales deberá coincidir con la preocupación regional a la que se aplican ^[79].

En las últimas décadas ha existido un gran avance en los indicadores físico-biológicos, pero la situación es diferente en el enfoque socio-económicos, caracterizados por la insuficiencia de datos y las debilidades del plano conceptual y metodológico. Sin embargo, se han empezado también a realizar estudios dentro de ésta perspectiva, adaptándose a enfoques de las ciencias físico-naturales ^[110]. Asimismo, con los indicadores adecuados, se pueden determinar el área que se encuentra en proceso de degradación, en combinación con roles climáticos y componentes humanos ^[47,55,95].

Diversas agencias internacionales o nacionales, han desarrollado marcos conceptuales de referencia, como el PS (Presión-Estado), PSR (Presión, Estado, Respuesta) y el DPSIR (Fuerza Propulsora, Presión, Estado, Impacto y Respuesta). Estos marcos tienen como función el asegurar una organización más eficiente del conocimiento y una mayor facilidad de comunicación. La estructura refleja el modelo conceptual usado para describir la complejidad de los procesos estudiados, siendo el DPSIR el más utilizado ^[80], al existir marcos internacionales, cada país desarrolla su propio sistema de indicadores para determinar la desertificación, pero muchos estudios no adoptan un criterio de selección formal, sino que realizan una selección arbitraria ^[130].

El DPSIR se considera como el más comprensivo, engloba los siguientes entornos (Figura 5) ^[79,80]:

- Indicadores de Fuerzas Impulsoras (D: *Driving Forces*): utilizados para describir las dinámicas sociales, económicas y demográficas de la población, es decir, las actividades humanas o naturales y los procesos de cambio que determinan los procesos que dan lugar a la desertificación.

MODELO PRESIÓN-ESTADO-RESPUESTA

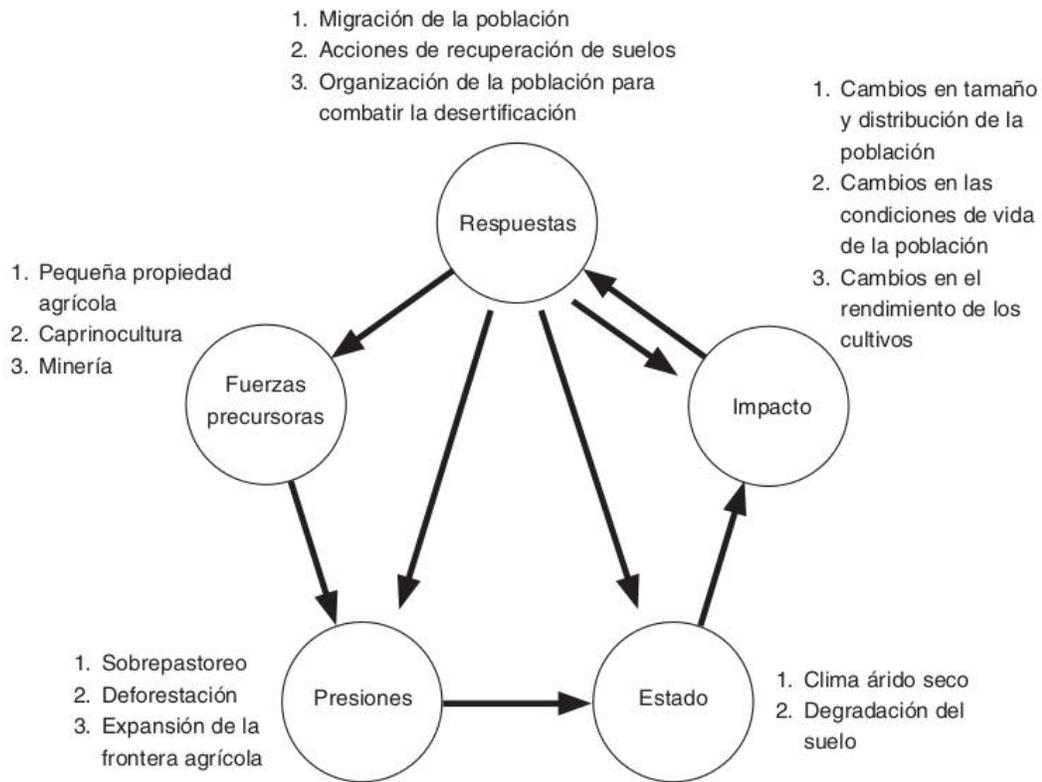


Figura 5. Diagrama de relaciones del modelo de Presión-Estado-Respuesta. Fuente: Parada (2005) ^[79], pág. 154.

- Presión (P: *Pressure*): corresponde a los indicadores de utilización de sustancias (emisiones), el uso de suelo o de cualquier recurso, son aquellos que dan cuenta de las causas inmediatas de la degradación de los suelos.
- Estado (S: *State*): describen la cantidad o calidad de los fenómenos físicos (como la temperatura), describiendo los procesos que dan lugar a la desertificación y a la degradación misma en un momento dado.
- Impacto (I: *Impact*): son los que sirven para medir cambios en el ambiente que afectan la vida social y económica como las condiciones de salud, disponibilidad de recursos o biodiversidad, principalmente, que dan cuenta de las consecuencias de la degradación del suelo.

- Respuesta (R: *Response*): miden las acciones que emprende el gobierno o la sociedad civil para prevenir, compensar, mejorar o adaptarse a los cambios en el estado del ambiente, es decir, se refiere a las medidas de lucha contra la desertificación.

Sin embargo, se debe señalar que hay aspectos que se deben considerar en la evaluación del problema, como por ejemplo ^[18]:

- *Estado*: definido como el estado o condición de una zona en particular en un momento específico en comparación con su estado o condición en un tiempo pasado.
- *Grado*: refiriéndose al cambio en la condición con el tiempo.
- *Riesgo inherente*: medida de vulnerabilidad de una zona para un proceso de desertificación.
- *Peligro*: clasificación global acorde a los puntos anteriores.

Además indicar que las consecuencias de la desertificación depende de factores que varían según la región, el país y el daño enfocados en ^[61]:

- La gravedad de la degradación y su extensión.
- La dureza de las condiciones climáticas (pluviometría y concurrencia de sequías).
- El número y la situación económica de las poblaciones afectadas.
- Nivel de desarrollo del país o región afectado.

Por lo que clasificación de la desertificación se puede dar en función del daño ocasionado, por ejemplo [5,61]:

- *Desertificación incipiente o potenciales*: Son áreas que pueden estar bajo cambios de clima y/o perder el equilibrio con las actividades humanas y verse poco afectadas. Controlando las causas que la originan pueden recuperarse en poco tiempo los suelos afectados.
- *Desertificación frágil*: Áreas que con cualquier cambio puede desarrollarse el proceso de desertificación. Para su recuperación son necesarios medidas de control y recuperación y controlar las causas que lo originaron.

- *Desertificación crítica o grave:* Áreas desertificadas, es la situación más extrema, prácticamente irreversible, su recuperación es muy costosa y casi siempre inviable, las probabilidades de éxito son muy escasas y de largo plazo.

Factores naturales

Los indicadores ambientales de desertificación se establecen principalmente en cuatro categorías: climáticos, bióticos, edáficos e intensidad de degradación ^[115].

El cambio climático es un tema interdisciplinario al igual que la desertificación, pero no representa el único factor principal que genera los procesos de degradación del suelo, sino que existe una gran relación compleja entre el clima y la desertificación considerándose que es imposible en la separación en el impacto del problema. Interactúan en distintos grados a través de ciclos complejos que apenas se comprenden, por lo que el cambio climático y la variabilidad del clima pueden agravar la desertificación al alterar las precipitaciones y las temperaturas de las zonas [3,17,60,95].

Dentro de la categoría climática, la sequía es un fenómeno que ocurre de manera natural en las tierras áridas y se produce cuando la precipitación es significativamente menor a los niveles normalmente registrados, produciendo desequilibrios hidrológicos severos que afectan en forma adversas a los sistemas de producción basados en el uso del suelo. Su relación con la desertificación es la disminución de los niveles hídricos de los acuíferos superficiales y subterráneos, afectando la cantidad y calidad de los abastecimientos de agua dulce. Aunque la sequía es uno de los componentes ambientales más determinantes en la adaptación, distribución y productividad de los seres vivos, más no es determinante en el proceso de desertificación pero si un catalizador, es decir, aumenta la velocidad del proceso, sin embargo, las tierras áridas afectadas por la sequías tienden a recuperarse rápidamente, por otro lado, si son afectadas por la desertificación es casi imposible recuperarse. La influencia de las precipitaciones como suministro de agua para las plantas, princi-

palmente, suele ser benéfica, existiendo casos excepcionales en que es perjudicial, tanto por exceso como por escasez, que dan origen a las erosiones ^[1,17,66,93].

Por otro lado, uno de los indicadores más importantes en el estudio de desertificación es el albedo, la disminución del albedo implica una mejora en la calidad de los suelos y el incremento implica una degradación de suelos ^[63]. A su vez, el aumento de albedo es causado por la degradación de los suelos (física y/o química), provocando un cambio en el balance de la radiación, que en consecuencia influye en las precipitaciones, además influir en las oscilaciones térmicas diarias que implica mayores dificultades para el desarrollo de la cobertura vegetal ^[62], resumiendo lo anterior, el albedo se correlaciona con: la erosión, las variaciones de humedad del suelo y la densidad de la vegetación ^[40].

El proceso de erosión se describe en función de la cobertura de vegetación, características de precipitación, topografía, características del suelo y los manejos ^[44,70]. La erosión es un factor fundamental en la degradación y desertificación de los suelos, tiene graves repercusiones en las funciones del suelo, dado que reduce la productividad de la tierra y se requiere así que los agricultores apliquen cada vez más fertilizantes y otros productos químicos ^[112].

La vegetación juega uno de los muchos indicadores para la identificación de la desertificación en las tierras secas. La pérdida y ganancia de la cobertura vegetal de un área determinada en el tiempo es un indicador importante para la detección de éste fenómeno ^[18,44,57,86]. Los bosques, por ejemplo, forman y retienen los suelos evitando así la erosión, favorecen la infiltración del agua al subsuelo alimentando los mantos freáticos, purifican el agua y el aire. También como recursos de fuente de bienes de consumo, tales como madera, leña, alimentos y otros productos de origen forestal no maderables (fibras, medicinas, etc.) ^[103]. Además la vegetación actúa como sumidero de dióxido de carbono (CO₂), al extraer éste gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis que a su vez está regulada por la disponibilidad de agua y nutrientes, acumulando en sus tejidos el carbono (C) fijado permitiendo la creación de biomasa, además de que algunas plantas aportan materia orgánica transfiriendo el carbono, al suelo por diferentes vías, entre las más importantes son la hojarasca,

los exudados¹ y la transferencia de carbono a los organismos que están asociados simbióticamente con las raíces ^[116]. Con la existencia de cubierta vegetal en el suelo, se reduce el impacto de las gotas de la precipitación, disminuyendo el desprendimiento del suelo que posteriormente es arrastrado por la corriente formada por la precipitación, asimismo aumenta y facilita la creación del contenido de materia orgánica en suelo ^[10,100,101].

La remoción o destrucción de la vegetación natural existente (deforestación) en un área determinada, ocasiona la pérdida de la biodiversidad y los servicios ambientales que ofrecen los bosques y selvas, erigiéndose como un factor del calentamiento global, mediante el aumento de la radiación reflejada a la atmósfera (albedo), la disminución en la formación de nubes, el aumento de la evapo-transpiración y la disminución de humedad del suelo, como secuela, reduce aún más la vegetación, la humedad y aumento de la vulnerabilidad a las erosiones del suelo ^[19,76,103]. Según SEMARNAT ^[101,103], la deforestación es quizás el mayor foco de atención en los procesos de deterioro de los recursos naturales, debido a que representa la transformación de un terreno con una cobertura vegetal dominada por especies arbóreas, a un terreno que carece de estos elementos, además de la eliminación de varias especies, modificando el clima a tal grado que bajo esas condiciones muchos organismos son incapaces de sobrevivir.

La deforestación depende de varios factores, pero uno muy importante es el económico, siendo una de las actividades de mayores ganancias a corto plazo. Los bosques en sí mismos tienen poco valor económico y es por ello que algunos productores obtienen un mayor beneficio eliminando los bosques empobrecidos² y emprenden otras actividades productivas en éstos predios como convertirlos en terrenos dedicados a las actividades agropecuarias en mayor proporción que la vegetación nativa ^[103].

¹ Sustancia secretadas a través de los poros de los tejidos vegetales tales como resinas, oleoresinas, bálsamos y gomas.

² Bosques empobrecidos: se refiere a aquellas áreas en que carecen de árboles más cotizados para la venta de madera.

Anteriormente los estudios y las evaluaciones de los efectos de la desertificación utilizaban solamente indicadores climáticos como temperatura, precipitación y cobertura vegetal, sin embargo, actualmente los indicadores han aumentado [5,18,26,86,95].

Factores Antropogénicos

Durante años, la actividad humana ha inducido cambios y añadido tensiones a escala local en los sistemas naturales. Entre las principales actividades, la agricultura y el sobrepastoreo de ganados son los factores humanos que disponen de una mayor importancia en la incidencia de la desertificación, no obstante, el sector agropecuario es una fuente de alimentos y empleos, pero además de la desertificación se le asocian problemas sustanciales de erosiones (hídricas y eólicas) y contaminación de los recursos hídricos [3,19,26,44,120].

Las actividades agropecuarias han sido identificadas como las mayores responsables de la deforestación, seguidas en importancia por los desmontes ilegales [103]. Dependiendo del uso de la tierra agropecuaria, la desertificación se manifiesta en diferentes formas [24]:

- Tierras agrícolas con riego: riego excesivo y el drenaje ineficiente conducen al anegamiento y a la salinización.
- Tierras agrícolas de secano: erosión del suelo, pérdida de materia orgánica y nutrientes del suelo.
- Pastizales: reducción de la productividad de las plantas, invasión de especies no palatables.

Durante décadas la agricultura convencional con el uso excesivo de agroquímicos sintéticos ha perjudicado el medio ambiente, contaminando y degradando los suelos, perdiendo así la microflora y microfauna del mismo [60], lo que da las pautas para la desertificación, que durante su proceso influye en la disminución de la producción de alimentos en las áreas afectadas [46,76].

Por otro lado, la expansión humana a llevado a la extinción a numerosas especies nativas y sobrecargado la atmósfera con gases y contaminantes que causan cambios en el clima. Los productos empleados en el desarrollo de las ciudades y poblados provienen de la explotación de recursos naturales, tanto para producción de alimentos, como madera para construcción, muebles, papel y plásticos. La adquisición de estos recursos de desarrollo, de alguna manera provoca ligeros a severos daños al ambiente ^[100]. Además generan otros contaminantes dentro de las ciudades que afectan a los organismos como la contaminación lumínica y atmosférica ^[103].

Existen indicadores en los aspectos socio-económicos que se han ido desarrollando en décadas recientes, pero para el estudio de la desertificación, éstos indicadores al igual que los indicadores naturales, deben de ser estudiados en el contexto de espacio-temporal, el cual permitirá reorganizar el grado de afectación en el estudio de monitoreo de la desertificación ^[62,86].

En el Anexo 1 se muestra una recolección de los principales factores asociados en el fenómeno de desertificación.

2.1.5. Lucha contra la desertificación

La lucha contra la desertificación es el conjunto de actividades que forman parte de un aprovechamiento integrado de las tierras de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas para el desarrollo sustentable y que tiene como objetivo ^[5,39]:

- Prevenir o reducir la degradación de los suelos.
- Rehabilitar las suelos parcialmente degradadas.
- Recuperar los suelos desertificados.

El éxito de los programas de conservación de suelos depende de varios factores y está estrechamente relacionado con las condiciones socioeconómicas. Cualquier gestión sustentable de tierras secas, se tienen que tener en cuenta el manejo integrado de los recursos hídricos, asimismo el manejo de la agricultura orgánica y conservación del suelo ^[1,112].

Cada país dispone de una manera u otra en el control de la desertificación, la rehabilitación de un ambiente degradado que comprende la intervención sobre el entorno cultural, social o natural ^[70]. Entre algunos métodos de combate a la desertificación, se encuentran: iniciativa de estabilidad de dunas, control de corrientes superficiales, establecimiento de rompevientos (control de erosión eólica), medidas biológicas, políticas, investigaciones sobre la desertificación, recuperación de bosques nativos, acompañar la implementación de prácticas de manejo sustentable de sistemas de producción agropecuaria ^[3,62].

Sin embargo, es menos costoso (económicas y ambientalmente) limitar los daños antes de que se produzcan ^[26]. Por lo tanto, combatir la desertificación requiere prevención y/o reducción de la degradación de suelos, rehabilitación de suelos degradados, y recuperación de tierras desertificadas ^[5].

Para ello, las visitas de campo y la percepción remota, son sugeridos como métodos para el estudio de la degradación y desertificación, sin embargo, la percepción remota en comparación de las visitas de campo, requieren menor costo, es más eficiente en tiempo, y la posibilidad de mapear el riesgo de las tierras degradadas [5]. Para todo esto, se requieren indicadores para determinar las zonas afectadas, por lo que distintos países han manejado un sistema de indicadores como por ejemplo: el Comité Científico Francés sobre Desertificación, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Proyecto MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) y el Proyecto DESERTLINK, así mismo la CNUCLD impulso el proyecto de Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas (LADA) ^[107].

2.1.6. México en la lucha contra la desertificación

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), es la organización representada en el combate de la desertificación ante la CNUCLD desde el 2005, por lo cual es responsable de promover acciones y políticas que incidan en la lucha contra el fenómeno, cuenta con un programa llamado ProÁrbol que dispone de varias variantes (Tabla 1).

En 1994, México formuló un documento guía de Plan de Acción de Combate Contra la Desertificación, además la inclusión de participación de la sociedad, particularmente las comunidades rurales ^[98] y en el año 2010, reitera su compromiso en la lucha contra la desertificación ^[108].

Como se mencionó anteriormente (Sección 1.1), México conformo el Sistema de Lucha Contra la Desertificación y Degradación de Recursos Naturales (SINADES), integrado por distintas independencias.

2.2. Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica

Dado la complejidad de los problemas ambientales se requiere de la incorporación de nuevas técnicas y herramientas, uso de una mayor cantidad de datos y mejores conocimientos en la elaboración de modelos ^[6].

La Percepción Remota y los Sistemas de Información Geográficas (SIG), guardan una estrecha relación desde sus comienzos, surgiendo como disciplinas independientes y sólo se unían bajo los estudios medios ambientales ^[59], siendo de gran utilidad al apoyar la descripción, explicación y predicción de patrones y procesos relacionados con el manejo de los recursos naturales en diferentes escalas geográficas ^[6].

La percepción remota o teledetección es un conjunto de técnicas que permiten obtener información a distancia de los objetos, a partir del análisis de imágenes, que son ampliamente procesadas e interpretadas para generar datos que puedan tener una aplicación en distintas áreas en tiempo real, con rapidez y de superficies extensas. Pero para que esta observación sea posible, es importante que entre los objetos y el sensor exista algún un tipo de interacción ^[12,13].

La interacción se realiza a través de tres elementos principales: el *sensor* que es el que detecta la señal energética que interactúa con el objeto; el *objeto observado* que puede ser distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la energía y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas; y *el flujo energético* que los pone en relación al sensor y el objeto observado ^[12,90].

Los Sistemas de Información Geográfica pueden ser utilizados para investigaciones científicas, la gestión de recursos y la planificación del desarrollo ^[113].

Existe una gran variedad de definiciones sobre los SIG, que a través de los años se siguen ampliando y/o modificando el concepto ^[38,41,82,91]. Algunas de ellas se acentúan en su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones [50].

Los SIG son sistemas informáticos que comprenden de *hardware* y *software* capaz de recopilar, almacenar, integrar, analizar y mostrar la información geográficamente referenciada, es decir, datos identificados de acuerdo a la ubicación, permitiendo analizar los datos de forma visual y ver los patrones, tendencias y relaciones que pueden no ser visibles en forma de tabla o por escrito, describiendo lugares de las superficie terrestre ^[20,58,64,68,113,126].

Los SIG surgen como una necesidad de proveer mayor y mejor información para facilitar la toma de decisión, es por ello que las temáticas que puede abordar un SIG están relacionadas a una necesidad de gestión. Se pueden clasificar como: a) científicas (ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio, desarrollo de modelos empíricos y cartográficas, modelos dinámicos, geología, climatología, arqueología, y percepción remota); b) gestión (cartografía automática, información pública, catastro, planificación física, ordenación territorial, planificación urbana, estudios de impacto ambiental, evaluación de recursos y seguimiento de actuaciones); c) empresarial (marketing, estrategias de distribución, servicio públicos, planificación de transportes y localización óptima) ^[126].

2.2.1. Aplicación en la identificación y monitoreo de la desertificación

Existe una gran diversidad de trabajos que utilizan diferentes fuentes de datos como mapas temáticos, imágenes satelitales y datos de campo. Asimismo hay trabajos que se elaboran dentro de un modelo ya establecido como es el MEDALUS, como es el caso de Farajzadeh y Egbal (2007)^[25], Rasmy *et al.* (2010)^[84], Gad y Shalaby (2010)^[27], Bakr *et al.* (2012)^[5], estableciendo ciertas modificaciones al modelo.

Por otro lado, se han utilizado diversos insumos e indicadores para determinar el impacto del fenómeno por ejemplo:

- Navone *et al.* ^[72] en el año 2002, utilizaron como indicadores el deterioro de la cubierta vegetal, erosión hídrica, erosión eólica, salinización, presión antrópica y presión animal, para ello utilizó imágenes del satélite Radar-Sat 1 para desarrollar un SIG para el monitoreo de la desertificación.
- Liu *et al.* ^[57] en el año 2003, a partir de imágenes del AVHRR con datos NVDI, utilizaron como indicador el NVDI y su coeficiente de variación en un lapso de tiempo de 18 años en la región central de Asia y oeste de China.
- Qin *et al.* ^[83] en el año 2004, estimó el daño de desertificación en el norte de China a partir de la degradación de la cubierta vegetal. Para ello utilizaron como insumo, observaciones de campo del suelo, expansión de la agricultura en cubiertas vegetales, interpretación de imágenes satelitales (MODIS y Landsat) y base de datos de cubierta vegetal.
- Changzheng *et al.* ^[9] en el año 2005, en la región de Ordos Plateau en el norte de China, estimaron a partir de imágenes MODIS (NVDI) e imágenes Landsat el impacto de desertificación.
- Asimismo, en el año 2005, Guo y Li ^[37], monitorearon un tipo de desertificación denominada como desertificación arenosa (sandy desertification), que de acuerdo con el autor, es una degradación de suelos caracterizados por erosión eólica originado por excesivas actividades humanas en regiones secas, para ello utilizaron imágenes Landsat (años 1986 y 2000), mapa de desertificación arenosa y mapa de usos de suelos.
- Yuang *et al.* ^[127], en el año 2006, realizaron un estudio sobre el impacto de construir una red ferroviaria. Utilizaron mapas de relieve, imágenes Landsat para determinar el tipo de erosión en el suelo y cobertura vegetal, mapa de uso de suelo, tipos de suelos y análisis de campo, para generar un mapa de distribución de tipo e intensidad de erosión de suelo a partir de una ecuación de cantidad de suelo erosionado.
- Li *et al.* ^[56] en el año 2007 determinaron zonas con desertificación a partir de imágenes Landsat, utilizando como indicador los usos de suelo a partir de princi-

pios jerárquicos e índice de clasificación, clasificando en cuatro tipos: ligeramente (cobertura de vegetación mayores al 70%), moderado (coberturas entre 70-40%), severo (entre 40-10%) y extremadamente severo (< 10%).

- Fang *et al.* ^[23], en el año 2008, utilizaron dos imágenes del sensor Landsat (1986 y 2000), con una clasificación supervisada determinó 12 tipos de cobertura y uso de suelo, de las cuales 8 clases no presentaron desertificación y otras en 4 categorías (ligero, moderado, alto y extremo), donde estas categorías está en base a los porcentajes de cobertura de vegetación y por proporción de arena.
- Zhang *et al.* ^[129], en ese mismo año, en su trabajo dispusieron como objetivo el desarrollo de una técnica o metodología que permita el seguimiento de desertificación en Yulin, China. Para ello, utilizaron como insumo mapas topográficos e imágenes Landsat generando dos bases de datos. La primera base de datos fue de geografía básica que incluye coordenadas geográficas, sistemas de ríos y drenajes, unidades administrativas, caminos y puentes y sitios residenciales. El segundo es una base de datos sobre el suelo desertificado, que incluye cobertura de suelos, NVDI y cobertura de vegetación, dirección media del viento, bosques, pastizales y zonas agropecuarias. Para el monitoreo se determinó mediante el porcentaje de cobertura del suelo a partir de NVDI, viento y zonas agropecuarias, bosques y pastizales.
- En el 2009, Yan *et al.* ^[125], utilizaron como insumo imágenes Landsat para determinar la cobertura de suelos y erosión eólica para los años 1975, 1989 y 2005. Xu *et al.* ^[123], utilizaron imágenes Landsat de tres años (1981, 1990 y 2000), datos de NVDI del sensor AVHRR de 1981 al 2000, incluyendo datos medios mensuales de temperatura y precipitación. El indicador que se utilizó fue el potencial de la producción primaria neta (NPP por sus siglas en ingles) y la diferencia entre potencial y el actual NPP. Por último, Meléndez *et al.* ^[67], determinaron el potencial de utilizar la percepción remota para los estudios del proceso de desertificación. Utilizando el producto MOD13Q1 (índices de vegetación), seleccionando el índice EVI (Enhanced Vegetation Index) para determinar la dinámica de la cubierta vegetal. Asimismo cartografía del programa CORINE Land Cover y diversos parámetros climatológicos tales como precipitación, temperatura y evapo-

transpiración. Estimando la relación entre dichas variables en relación a las estimaciones del índice de vegetación.

- En el 2010, Hao y Zhao ^[42], utilizaron las imágenes Landsat (1985 y 2000) para analizar los efectos de los tipos de usos de suelos tales como área cultivada, bosques, agua, residencia/industrial y sin uso. Asimismo su conversión a desertificación. Kasimu y Tateishi^[54], usaron el producto MOD43A4, datos de sensores ASTER y Landsat, datos geofísicos como elevación, precipitación, temperatura y cobertura de suelos. Usaron el método de clasificación por árbol de decisión. Usando como parámetro la cobertura de vegetación para determinar el riesgo del fenómeno. Santini *et al.* ^[95], propusieron una metodología para generar un índice que integra seis factores que inciden en el fenómeno (pastoreo, productividad vegetativa, fertilidad del suelo, intrusión de agua de mar, erosión hídrica y eólica) siendo modelado cada uno de ellos. Zhang *et al.* ^[128], monitorearon la desertificación a partir de datos NVDI de MODIS calculando el índice de cobertura de vegetación f y a partir de esto se clasificó en cuatro clases la desertificación.
- En el año 2011, Huo *et al.* ^[51], proponen un método para obtener mediciones de campo, que permite identificar zonas con desertificación de manera precisa a partir de datos de albedo superficial.
- Duanyang *et al.* ^[21] en el año 2012, utilizaron como indicadores la cubierta vegetal, balance energético de la superficie terrestre y contenido de humedad. La fuente de estos indicadores fueron productos MODIS. Realizaron una clasificación de vulnerabilidad a partir del modelo de clasificación de un árbol de decisión.
- En el año 2013, Petta *et al.* ^[81], utilizaron datos de precipitación e imágenes de NDVI de MODIS, datos Landsat ETM+, datos de campo, mapas temáticos (pendiente, tipos de suelos, morfología, etc.) para obtener un mapa de zonas degradadas y susceptibles a desertificación.

La mayoría de los trabajos se fundamentaron en realizar una clasificación de acuerdo con la cubierta vegetal y los usos de suelo para identificar zonas con desertificación. Sin embargo, existe una alternativa que es poco aplicada en estos estudios y son las técnicas de evaluación multicriterio (EMC), que muestran una mayor

eficiencia al modelar fenómenos permitiendo la combinación de diferentes factores que posibilitan la identificación de zonas a desertificación.

2.3. Sensor Espectroradiómetro para Imágenes de Resolución Moderada

El sensor Espectroradiómetro para Imágenes de Resolución Moderada (MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer*), de acuerdo con la revisión bibliográfica es el sensor más completo operado a bordo del Sistema de Observación Terrestre de la NASA (EOS - *Earth Observing Systems*), en los vehículos espaciales TERRA y AQUA, lanzados en diciembre del año 1999 y mayo del 2002 respectivamente. La órbita a la Tierra es una altura aproximada de 705 km. Permite obtener imágenes diarias de toda la superficie terrestre, con una anchura de visualización de 2,330 km en 36 bandas espectrales y con cuatro resoluciones espaciales de 250 m (1-2 bandas), 500 m (3-7 bandas), 1,000 m (8-36 bandas) y 5,600 m (0.05°) [4,12,28,29,31,89,90,114,122].

MODIS fue diseñado y desarrollado con el objetivo de servir a la comunidad científica para los estudios del sistema terrestre y sus cambios con el tiempo y regiones geofísicas mediante la recopilación de datos de varios años [122], siendo el primer sensor con capacidad hiperespectral [12]. Ofrece una gran cantidad de productos clasificados como atmosféricos, terrestres y marinos [4]. Asimismo permite disponer de manera directa los datos crudos (bandas espectrales), que se transfieren desde el sensor a las estaciones en tierra en White Sands, Nuevo México, a través del seguimiento y retransmisión de datos desde el sistema de satélites TDRSS (por sus siglas en inglés: *Tracking and Data Relay Satellite Systems*), que posteriormente los productos e imágenes originales son accesibles en forma gratuita en internet para todos los interesados [12,29,89].

Debido a la cobertura global y alta resolución temporal del sensor MODIS, la cantidad de datos generados es enorme. Actualmente cubren un periodo de superior de 13 años, lo que permite la elaboración de series de tiempo uniforme y el seguimiento de procesos ambientales y ecológicos, teniendo disponible productos con

resoluciones temporales de todos los días, 8 días, 16 días, mensuales, trimestrales y anuales ^[28,114]. De acuerdo con Ouyang *et al.* ^[77], MODIS ha sido aplicado en muchas investigaciones por dos razones:

- 1) La ventaja de tener datos diariamente.
- 2) La posibilidad para obtener datos con gran calidad que cubren grandes extensiones de terreno.

2.3.1. Especificaciones y características del sensor

Las orbitas de MODIS TERRA y MODIS AQUA son helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98°, a una altitud de 708 y 705 km respectivamente, monitoreando la superficie terrestre 1 o 2 días dependiendo de la latitud. Dispone de una alta sensibilidad radiométrica (12 bits), en 36 bandas espectrales, en un rango de longitud de onda que va de los 0.4 μm a los 14.4 μm ^[29,30,90].

Los datos MODIS ofrecen tres diferentes dimensiones de información originada del sensor ^[30]:

- 1) *Espectral*: la información espectral es una estimación de la reflectancia de la superficie.
- 2) *Temporal*: alta resolución temporal que permite el análisis a través del tiempo.
- 3) *Angular*: debido al amplio campo de visión que proporcionan los sensores MODIS, es posible tener registros del mismo píxel muestreado en diferentes geometrías objeto-sensor-sol, es decir, la observación multiangular contiene información adicional a la adquirida únicamente en el nadir o en un solo ángulo.

2.3.2. Productos MODIS

Los datos generados por el sensor MODIS, son ampliamente utilizados por la comunidad científica, a partir de ellos, se elabora una gran variedad de productos que están sujetos a un proceso de validación que incluyen comparaciones con da-

tos tomados *in situ* en sitios de prueba, comparaciones con datos y productos de otros sensores como ASTER, AVHRR, Ikonos, MISR, TM/ETM+, y con datos de referencia obtenidos de manera independientes ^[28].

Los productos utilizan un sistema de red sinusoidal y están organizados en una retícula de 1,200 x 1,200 km (10° x 10° al ecuador), cada cuadro se le llama *tile* y se localizan por un número de columna (h) y línea o fila (v). La retícula consiste en 460 sectores, donde 188 cuadros (blancos) no contienen información, 132 contienen información que muestran 100% agua y los restantes 275 contienen información terrestre. El sistema de coordenadas de los tiles comienza en (0,0), número de tile horizontal y número de tile vertical, comenzando en la esquina superior izquierda, y procede el conteo hacia la derecha y hacia abajo, teniendo en la esquina inferior derecha las coordenadas (37,17) (Figura 6).

Los productos se encuentran en el formato Hierarchical Data Format - Earth Observing Systems (HDF - EOS). El formato HDF es desarrollado por NSCA siendo un estándar de formato de archivo para los sistemas de datos de información EOS (EOSDIS por sus siglas en inglés: EOS Data Information System) ^[28,114,117,119].

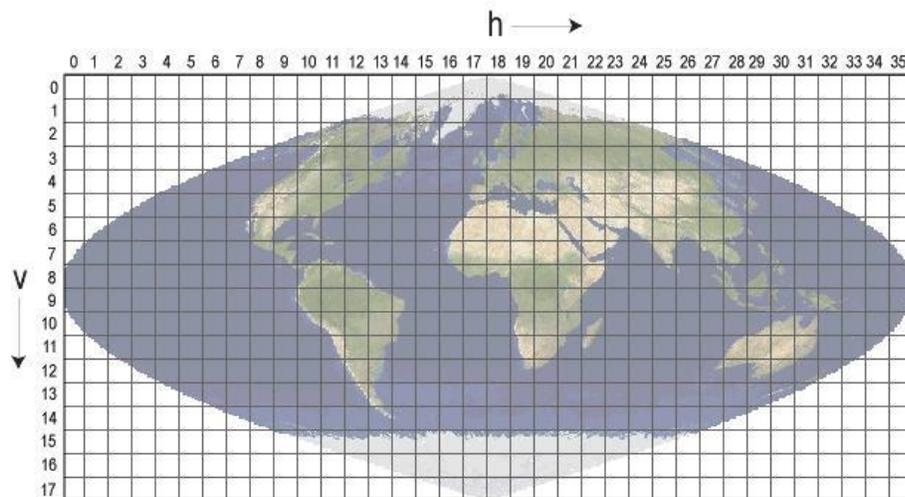


Figura 6. Retícula sinusoidal del sensor MODIS. Fuente: USGS (2011)^[114].

Además, éstos productos están calibrados físicamente y disponibles los algoritmos que se han empleado en su generación, lo que permiten ser validados y analizados ^[12].

2.3.3. Niveles de procesamiento de los datos MODIS

La elaboración de los productos sigue una cadena de procesamientos ^[28]. Las fases están divididas en 5 niveles (0-4) en función al grado de procesamiento realizado ^[29,114].

- Nivel 0: dispone de datos en bruto sin ningún tratamiento y solo la información de sincronización y los encabezados de comunicación con el satélite y la estación han sido eliminados.
- Nivel L1: Contiene los datos de geolocalización (MOD03), es decir, las coordenadas geodésicas, información sobre la elevación del terreno, máscara de tierra/agua, ángulo de elevación, cenit y azimut del satélite y del sol.
 - Nivel 1A: productos utilizados para la geolocalización, la calibración y el procesamiento. Contiene los niveles de radiancia (MOD01), de las 36 bandas espectrales, junto con datos auxiliares del sensor y satélite.
 - Nivel 1B: Imagen radiométrica corregida y calibrada a unidades físicas. Contiene las radiancias y geolocalización (MOD02), para las bandas generadas por el nivel 1A.
- Nivel L2: productos generados a partir de los productos del nivel L1B aplicando correcciones atmosféricas y algoritmos bio-ópticos.
 - Nivel L2G: producto generado con datos obtenidos durante un periodo fijo de tiempo (12 o 24 horas), posteriormente agrupados en una cuadrícula de 1,200 x 1,200 km. Contienen variables geofísicas proyectadas en una malla uniforme.
- Nivel L3: productos derivados de variables geofísicas mapeadas, con resoluciones temporales de 1, 8, 16 y 30 días. Algunos productos son reflectan-

cia (MOD09), índices de vegetación (MOD13), temperatura y emisividad de la superficie terrestre (MOD11) y puntos de calor de incendios (MOD14).

- Nivel L4: productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos para así estimar variables geofísicas, son generados usando productos de nivel 2 y datos auxiliares. Ejemplo: índice de área foliar/fracción de radiación activa fotosintética (MOD15), coberturas de suelo (MOD12) y producción primaria (MOD17).

El sensor MODIS tiene disponible 44 tipos de productos de datos estándar, clasificados en 5 segmentos en distintos enfoques (calibración, atmósfera, tierra, criosfera y océano). Son utilizados para el estudio de los cambios globales en una gran variedad de disciplinas ^[90]. Pero se encuentran divididos en tres grandes grupos: enfocados al estudio de los océanos (MOcean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criosfera y las cubiertas terrestres (MODLAND) ^[28]. Un listado de estos productos se puede encontrar en Rodríguez y Arredondo (2005) ^[90].

Dentro del enfoque MODLAND se puede dividir en tres categorías ^[28]:

- Variables relacionadas con el balance de energía.
- Variables biofísicas relacionadas con la vegetación.
- Características de la cobertura terrestre.

2.3.4. Producto MOD11: temperatura y emisividad de la superficie terrestre

Los productos MOD11 brindan estimaciones de la temperatura y de la emisividad diurna y nocturna de las coberturas terrestres ^[28,89]. La temperatura se mide en grados Kelvin al contacto entre la cobertura y la atmósfera. La emisividad, es un número adimensional igual al cociente entre la radiación emitida por un objeto y un cuerpo negro a la misma temperatura. Utiliza un algoritmo que permite estimar la emisividad y la temperatura a partir de un par de imágenes diurnas y nocturnas tomadas en condiciones de cielo despejado utilizando 7 bandas del infrarrojo medio y

térmico (bandas 20, 22, 23, 29, 31, 32 y 33) en cualquier tipo de cobertura de suelo [28].

Para la estimación de la temperatura superficial desde el espacio se han desarrollado algunos de métodos, entre ellos [118]:

- 1) *Método de canal de infrarrojo único*. Requiere emisividad de la superficie y un modelo de transferencia de radiación precisa y perfiles atmosféricos que debe ser dada por cualquier dato de radiosondeo de los satélites.
- 2) *Método de split windows*. Utiliza diversos algoritmos de temperatura de la superficie marina en múltiples canales, que corrigen los efectos de emisividad atmosférica y emisividad de la superficie como una entrada sobre la base de la absorción diferencial en una ventana dividida (*split window*).
- 3) *Método LST día/noche de MODIS*. Utiliza los datos pares de día y noche en siete bandas de MODIS para recuperar simultáneamente las temperaturas superficiales y una banda de promedio de emisividad sin conocer la temperatura atmosférica y los perfiles de vapor de agua a alta precisión.

La técnica *split-window* es la más usada debido a la simplicidad en su uso y aplicación. Por lo que la temperatura superficial terrestre de MODIS es obtenido por ésta técnica [7,19]. Es computacionalmente simple, pero no es eficiente en la escala global, se basa en el uso de la absorción diferencial entre dos canales dentro de una ventana atmosférica con el fin de eliminar la influencia ejercida, se calcula la temperatura superficial (T_s) como una combinación lineal de dos temperaturas del brillo [7]. Para la obtención de las estimaciones de T_s a nivel de píxel a partir del método de técnica de *split-window*, es necesario formular un algoritmo generalizado con previo conocimiento de las emisividades de la superficie observada. Para la obtención de las emisividades de la superficie se infiere a partir del producto MODIS generado previamente de tipos de cobertura terrestre (MOD12). La forma numérica generalizada de la ecuación es de tipo lineal tomando en cuenta la temperatura de brillo y las emisividades en las bandas 31 y 32 de MODIS [49].

La ecuación *split-window* generalizada que se utiliza en el cálculo del producto temperatura superficial terrestre es [49,118]:

$$T_s = \left(A_1 + A_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + A_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \frac{T_{31}T_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + B_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) (T_{31}T_{32}) + C$$

Donde ($\varepsilon = 0.5(\varepsilon_{\varepsilon 31} + \varepsilon_{\varepsilon 32})$); $\Delta\varepsilon$ es la diferencia de emisividad entre la banda 31 y 32 ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{31} - \varepsilon_{32}$); T_{31} y T_{32} son la temperatura radiativa en las bandas 31 y 32; los parámetros $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ y C son propios de la ecuación *Split-Window* ajustada.

La obtención de los parámetros o coeficientes óptimos se siguen las siguientes fases o pasos ^[118]:

- Los perfiles de temperatura atmosférica son separadas en 2 grupos de acuerdo a la temperatura del aire cercano a la superficie ($T_{aire} \leq 280 K$ o $T_{aire} > 280 K$). El primer grupo está compuesto por atmósfera de invierno secos; en el segundo grupo la atmósfera de veranos cálidos.
- Las columnas de vapor de agua atmosférico son separadas en intervalos de 0.5 cm.
- La condición de la temperatura de superficie es separada en dos grupos de acuerdo a la temperatura del aire ($T_{aire} - 16^\circ K \leq T_s \leq T_{aire} + 4^\circ K$ o $T_{aire} - 4^\circ K \leq T_s \leq T_{aire} + 16^\circ K$). El primer grupo representa las condiciones nocturnas y el segundo grupo a las condiciones diurnas.
- Las bandas de emisividad son especificadas por $0.89 \leq \varepsilon \leq 1$ en pasos de 0.01 y $-0.025 \leq \Delta\varepsilon \leq 0.015$ en pasos de 0.005.
- 9 ángulos de visión son seleccionados para cubrir todo el rango de visión al nadir a 65.5° .

Son determinados por los análisis de regresión separados de los datos simulados en cada grupo de temperatura de superficie, en cada intervalo de vapor de agua en cada columna en los 9 ángulos de visión. Las columnas de vapor de agua y de temperatura del aire se obtienen de los productos MODIS de perfiles atmosféricos ^[49,118].

Para la obtención del producto MOD11A2 está basado en un simple método de promediado de los productos MOD11A1 para 8 días. Los productos MOD11A1 son elaborados a partir de los resultados de MOD11A_L2, generado de los datos de

productos de radiancia del sensor (MOD021KM), geolocalización (MOD03), temperatura atmosférica y perfiles de agua (MOD07_L2), máscara de nubes (MOD35_L2), cobertura de suelos trimestral (MOD12Q1) y nieve (MOD10_L2) ^[119].

El conjunto de datos que contiene el MOD11A2 son: Temperatura superficial terrestre diurna (1 km); control de calidad de LST diurno y emisividad; hora diurna de LST; ángulo cenital del LST diurno; control de calidad de LST nocturna y emisividad; hora nocturna de la observación de LST; ángulo cenital de LST nocturno; bandas 31 y 32; cielo despejado diurno y nocturno ^[119]. Las características de los demás productos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Subproductos de MOD11 y características. Fuente: García Mora y Francois ^[28], Wan ^[119].

Subproducto	Resolución temporal	Resolución espacial	Nivel de procesamiento	Tamaño de archivo (MB)
MOD11_L2	Escena	1 km	L2G	6
MOD11A1	Diario	1 lm	L3	4
MOD11B1	Diario	6 km	L3	0.4
MOD11A2	Diario	1 km	L3	5
MOD11C1	Diario	0.05°	L3	50
MOD11C2	8 días	0.05°	L3	70
MOD11C3	mensual	0.05°	L3	80

2.3.5. Producto MCD12: cobertura de suelo y sus cambios

El MOD12 es un mapa de coberturas de suelo con base a diferentes sistemas clasificatorios, en total cinco sistemas de clasificación ^[28,89]:

- 1) El Programa Internacional Geosfera-Biofera (IGBP), el cual tiene 17 categorías incluyendo 11 categorías de vegetación natural, 3 categorías de mosaicos y 3 de coberturas no vegetales.

- 2) Similar al IGBP pero modificado por la Universidad de Maryland (UMD) con 14 categorías.
- 3) Biomás basados en el LAI/FPAR con 12 categorías.
- 4) Biomás-ciclo biogeoquímico (Biome-BGC) con 10 categorías.
- 5) Sistema de clasificación (TBT) basado en 12 categorías funcionales de plantas y utilizan modelos climáticos.

Las clases de cobertura de tipo de suelo se asignan mediante el procesamiento de la base de datos de 32 días. Ésta base de datos es procesada usando árboles de decisión y algoritmos de clasificación de redes neuronales a partir de la radiación reflejada y emitida, medido de forma remota a través del tiempo y el espacio, combinando datos auxiliares para proporcionar una base de datos para las cubiertas de suelo que incluyen información espectral, de dirección, espacial y temporal. La base de datos incluye: indicador de tierra-agua, reflectancia al nadir ajustado de la función de reflectancia bidireccional (BDRF), canal de textura, índice de vegetación, información direccional, temperatura superficial terrestre, cobertura de nieve y hielo. El clasificador de árbol de decisión proporciona un enfoque para la reducción de datos en el reconocimiento de patrones. Es una clasificación supervisada por lo que requiere zonas de entrenamiento para los datos, empleando reglas estructuradas. La clasificación por redes neuronales, utiliza el algoritmo *back propagation*, que ajusta las redes con pesos que producen una convergencia entre las redes de salidas y los datos de entrenamiento ^[28,89]. En la Tabla 2 se muestran los subproductos.

Tabla 2. Subproductos de MCD12 y características- Fuente: García Mora y Francois ^[28].

Subproducto	Resolución temporal	Resolución espacial	Nivel de procesamiento	Tamaño de archivo (MB)
MCD12C1	Anual	0.05°	L3	1300
MCD12C2	Anual	1 km	L3	25
MCD12Q1	Anual	1 km	L3	45
MCD12Q2	Anual	500 m	L3	90

2.3.6. Producto MOD13: índice de vegetación

MOD13 proporciona constantes comparaciones espaciales y temporales del verdor de la vegetación del dosel, una propiedad compuesta de área foliar, la clorofila y la estructura de la cubierta, los cuales pueden ser usados para el monitoreo terrestre de la actividad fotosintética en soporte fenológico, detección de cambios, e interpretaciones biofísicas [89,106].

Efectúa una división píxel a píxel, donde el uso de los cocientes sirve para la diseminación de masas vegetales dado que dispone de un comportamiento radiométrico la vegetación, es decir, la firma espectral de la vegetación sana se muestra en contraste entre las zonas del infrarrojo cercano (IRC) y del rojo (R), por lo tanto entre mayor diferencia entre las reflectividades de las bandas del IRC y R, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observable [12].

Éste producto presenta dos índices de vegetación: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) e índice de vegetación mejorado (EVI) [28,89].

El NVDI es utilizado para estimar diversos parámetros de la cubierta vegetal, entre los parámetros relacionados al NVDI están: contenido de clorofila y agua en la hoja, flujo neto de CO₂, radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, productividad neta de producción, índice de área foliar (LAI), cantidad de lluvia recibida por el dosel vegetal, dinámica fenológica, evapotranspiración potencial [12].

La fórmula comúnmente empleada es expresada en la ecuación:

$$NVDI = \frac{R_{i,IRC} - R_{i,R}}{R_{i,IRC} + R_{i,R}}$$

Dónde: R_{IRC} y R_R son respectivamente los valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano y rojo. i indica las reflectividades del píxel en la banda del infrarrojo cercano y del rojo.

El cociente varía entre márgenes conocidos (-1 y +1), lo que permite facilitar su interpretación [12,106].

El EVI se optimizó a partir de NVDI, aumentando la sensibilidad de NVDI obtenido con base al sensor AVHRR para extender el registro de datos a mayor plazo en los estudios de monitoreo, además es más sensible a las variaciones estructurales del dosel, incluyendo el índice de área foliar (LAI), el tipo y la arquitectura del dosel y la fisionomía de las plantas ^[28].

El EVI se obtiene a partir del cálculo del cociente normalizado de la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo ^[12,28]:

$$EVI = G \frac{R_{IRC} + R_R}{R_{IRC} + C_1 R_R - C_2 R_A + L}$$

Dónde: R_{IRC} , R_R y R_A son valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano, del rojo y del azul con una corrección de los efectos de la atmósfera. L es un ajuste del fondo del dosel que toma en cuenta la transferencia radiante diferencial del infrarrojo cercano y el rojo a través del dosel. G es un factor de ganancia y C_1 , C_2 son los coeficientes de resistencia de aerosoles, que usan la banda azul para corregir la influencia del aerosol en la banda roja. Los coeficientes adoptados en el algoritmo EVI son $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$ y $G = 2.5$.

El algoritmo para elaborar los productos de 16 días opera para cada píxel y consiste en seleccionar las mejores observaciones dentro de este periodo. El MOD13 contiene un conjunto de datos que incluyen: los valores NVDI y del EVI, las reflectancias de las bandas en rojo (banda 1), infrarrojo cercano (banda 2), infrarrojo medio (banda 6) y del azul (banda 3), así como el ángulo de visión y de inclinación solar, la fecha de toma de los píxeles seleccionados del compuesto y la capa de información de calidad ^[28].

Los subproductos que se encuentran en MOD13 se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Subproductos de MOD13 y características. Fuente: García Mora y Francois^[28].

Subproducto	Resolución temporal	Resolución espacial	Nivel de procesamiento	Tamaño de archivo (MB)
MCD12C1	Anual	0.05°	L3	1300
MCD12C2	Anual	1 km	L3	25
MCD12Q1	Anual	1 km	L3	45
MCD12Q2	Anual	500 m	L3	90

2.3.7. Producto MOD17: producción primaria y fotosíntesis neta

El producto MOD17 está diseñado para proporcionar una medida del crecimiento de la vegetación brindando una estimación de la producción primaria y fotosíntesis neta ^[28,89]. La productividad primaria es la proporción en la cual la energía es transformada en biomasa de las plantas; la productividad primaria bruta (GPP - *Gross Primary Production*) es la sumatoria de toda la energía convertida en biomasa y es medido en gramos de carbono por unidad de área por día ^[4].

La GPP de un ecosistema es la energía total fijada por fotosíntesis y la producción primaria neta (NPP - *Net Primary Production*) es la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada por la respiración. Cuando la respiración primaria neta es positiva, la biomasa de las plantas va aumentando (árboles jóvenes crecen), pero cuando los árboles envejecen, siguen haciendo fotosíntesis pero toda la energía se emplea en la respiración, por lo tanto, la producción neta es nula y la masa vegetal ya no aumenta. Éste producto es esencial en el cálculo de energía terrestre, carbono, procesos del ciclo del agua y bioquímica de vegetación. Por lo que estima la productividad de la vegetación a partir de la radiación absorbida en el rango del espectro fotosintético ^[28]. Los subproductos MOD17 se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Subproductos de MOD17 y características. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de García Mora y Francois ^[28], MODIS ^[69].

Subproducto	Resolución temporal	Resolución espacial	Nivel de procesamiento	Tamaño de archivo (MB)
MOD17A2	8 días	1 km	L4	0.02 – 7
MOD17A3	1 año	1 km	L4	7

El algoritmo de MOD17 se basa en el uso eficiente de la radiación lógica original de Monteith (*original radiation use efficiency logic of Monteith*), lo que sugiere que la productividad de los cultivos anuales bajo condiciones de buen riego y fertilizado se relaciona linealmente con la cantidad de energía solar absorbida específicamente la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR - *Absorbed Photosynthetically Active Radiation*). La estimación real de la productividad APAR se realizó a través de un parámetro de eficiencia (ϵ), que varía de acuerdo al tipo de vegetación y las condiciones climáticas. En consecuencia, MOD17 incorpora diferencias en la máxima ϵ bajo condiciones estrés hídrico y/o condiciones de temperatura. Para el cálculo NPP, MOD17 también calcula la hoja diaria y el mantenimiento de respiración de la raíz (R_{ir}), respiración de crecimiento anual (R_g), y la respiración de mantenimiento anual de las células vivas en el tejido leñoso (R_m). Los principales datos de entrada que requiere para generar el producto MOD17 son ^[75]:

- Fracción de la radiación fotosintéticamente activa (FPAR - *Fraction of Photosynthetically Active Radiation*) e índice del área foliar (LAI - *Leaf Area Index*), obtenidos a partir del producto MOD15 LAI/FPAR.
- Temperatura, radiación solar entrante y déficit de presión de vapor derivado de un conjunto de datos meteorológicos. El conjunto de datos meteorológicos usado en MOD17 son obtenidos de *NASA Global Modeling and Assimilation Office* y *NCEP/NCAR Reanalysis II*.
- Clasificación de cobertura terrestre obtenido de los productos MODIS MCD12Q1.
- Un parámetro de la tabla de búsqueda de Bioma (BPLUT - *Biome Parameter Lookup Table*), que contiene los valores de eficiencia de máxima radiación (ϵ_{max})

para los diferentes tipos de vegetación y otros parámetros fisiológicos de biomas específicos para el cálculo de respiración. Los diferentes tipos de vegetación se obtienen a partir del tipo de cobertura 2 de MCD12Q1 (UMD).

La siguiente información es obtenido de Heinsch *et al.* [43].

GPP

Para el cálculo del GPP se requieren 5 parámetros:

- 1) Conversión de eficiencia de máxima radiación (ϵ_{max}) en Kg C M J^{-1} .
- 2) Temperatura mínima diaria en la que $\epsilon = \epsilon_{max}$ (TMINmax) en grados Celsius.
- 3) Temperatura mínima diaria en la que $\epsilon = 0.0$ en grados Celsius (TMINmin).
- 4) Déficit de presión de vapor medio diurno en que $\epsilon = \epsilon_{max}$ (VPDmax).
- 5) Déficit de presión de vapor medio diurno en que $\epsilon = 0.0$ (VPDmin).

Los dos parámetros de TMIN y de VPD son usados para calcular los escalares de que atenúan $\epsilon = \epsilon_{max}$ para elaborar finalmente ϵ (Kg C M J^{-1}) utilizado para predecir GPP tal que:

$$\epsilon = \epsilon_{max} * TMIN_{scalar} * VPD_{scalar}$$

Los valores TMIN y VPD son obtenidos de *Data Assimilation Office* (DAO), el valor de $\epsilon = \epsilon_{max}$ es obtenido de BPLUT.

ϵ es combinado para estimar APAR para calcular GPP (Kg C Día^{-1}) como:

$$GPP = \epsilon * APAR$$

$$APAR = IPAR * FPAR$$

Dónde: *IPAR* es el incidente de la radiación fotosintéticamente activa de la vegetación, siendo estimado desde la incidencia de la radiación de onda corta (SWRad) proveído de DAO como:

$$IPAR = SWRad * 0.45$$

La ecuación para obtener GPP, es calculado para todos los días, se crean sumatorias de 8 días de GPP y se encuentra disponible al público. Las sumas son nombradas por el primer día incluido en el periodo de 8 días.

FSNet

Para el cálculo del NPP se requiere la información del mantenimiento de respiración y fotosíntesis neta (FSNet).

Requiere de 5 parámetros que se encuentran en BPLUT:

- 1) Área foliar proyectada por unidad de masa de carbono foliar (SLA) en $\text{m}^2 \text{Kg C}^{-1}$.
- 2) Coeficiente de carbono de raíces a carbono foliar (*fruit_leaf_ratio*).
- 3) Respiración de mantenimiento por unidad de carbono foliar por día en 20° C (*leaf_mr_base*) en $\text{Kg C Kg C}^{-1} \text{dia}^{-1}$.
- 4) Respiración de mantenimiento por unidad de raíz de carbono por día en 20° C (*fruit_mr_base*) en $\text{Kg C Kg C}^{-1} \text{dia}^{-1}$.
- 5) Parámetro de forma de exponente en el control de la respiración como una función de temperatura (*Q10_mr*).

Estos parámetros son necesarios para el cálculo diario de los costos de mantenimiento de respiración, el cual es dependiente de la masa de las hojas y raíces a una temperatura base de mantenimiento de respiración de 20°C y temperatura media diaria. El cálculo de la masa de la hoja (Kg) es:

$$Leaf_{Mass} = \frac{LAI}{SLA}$$

Dónde: LAI es el índice de área foliar, obtenido de MOD15 y el área específica foliar (SLA), es obtenido de BPLUT.

La masa de raíz es estimada:

$$Fine_root_Mass = Leaf_Mass * fruit_leaf_ratio$$

Dónde: *fruit_leaf_ratio* también es obtenido de BPLUT.

El mantenimiento de respiración foliar es calculado:

$$Leaf_MR = Leaf_Mass * Leaf_mr_base * Q10_mr^{[(T_{avg}-20)/10]}$$

Dónde: Leaf_mr_base es obtenido de BPLUT y Tavg es la temperatura media diaria (°C) estimado desde DAO.

El mantenimiento de respiración de la masa de raíz es calculado:

$$Froot_MR = Fine_Root_Mass * froot_mr_base * Q10_mr^{[(T_{avg}-20)/10]}$$

Finalmente, PSNet (Kg C día⁻¹), puede ser calculado a partir de GPP, y mantenimiento de respiración como:

$$PSNet = GPP - Leaf_mr - froot_mr$$

NPP

Finalmente, para el mantenimiento anual de la respiración es expresada como:

$$NPP = \sum_{i=1}^{365} PSNet - (R_m + R_g)$$

Dónde: R_m es el mantenimiento de la respiración de todas las demás partes excepto de las hojas y raíces finas y R_g es la respiración en el crecimiento.

Para más información sobre la obtención de MOD17 en Heinsch *et al.* ^[43] y Maosheng ^[65].

2.3.8. Producto MCD43: albedo

Dado que la superficie terrestre es anisotrópica, es decir, que dependiendo del ángulo de iluminación solar, la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones como ocurre con una superficie isotrópica, la reflectancia depende de las propiedades espectrales de la radiación incidente y también de la dirección desde la cual dicha superficie es iluminada y vista, en otras palabras, depende de la geometría iluminación-visión (sol-sensor) y es descrita por la función de distribución de re-

reflectancia bidireccional (BRDF) que permite el ajuste de los valores de la reflectancia para la minimización de los efectos de la anisotropía ^[28].

La serie MOD43 describe la reflectancia de la superficie del suelo o el albedo y es la relación (expresada en porcentaje) de la radiación que refleja cualquier superficie e incidencia sobre los mismos. Por lo que es un parámetro de gran importancia en la evaluación del balance energético del planeta ^[8,28,96,121].

El albedo es obtenido como BRDF ^[121], los parámetros de distribución caracteriza la anisotropía de las coberturas del suelo y la reflectancia corregida por esta función ^[28], es decir, especifica el comportamiento de la dispersión de la superficie como una función de los ángulos de iluminación y vista a una longitud de onda particular ^[96].

La obtención de los valores de reflectancia corregidos, los parámetros de la BRDF se aplican a las reflectancias del producto MOD09 tomando en cuenta el ángulo solar del medio día local.

El algoritmo que se utiliza para la generación de éste producto permite la evaluación de un modelo semiempírico, que permite describir la anisotropía de cada píxel tomando en cuenta la dispersión y las sombras. Pero la obtención de la inversión del modelo se requiere por lo menos 10 imágenes de buena calidad (sin nubes). El albedo y el BRDF se calculan con base en múltiples observaciones del mismo píxel, es por ello, que es un producto compuesto de 16 días que se produce cada 8 días a partir de un modelo de reflectancia bidireccional semiempírico de núcleo impulsado (*Semiempirical Kernel-Driven Bidirectional Reflectance Model - SKDBRM*). Este modelo determina el conjunto global de parámetros que describen el BDRF de la superficie terrestre (MCD43A1), éstos parámetros se utilizan para determinar la reflectancia hemisférica direccional (Black-Sky Albedo), y la reflectancia bihemisférica (White-Sky Albedo), para 7 bandas espectrales (bandas de MODIS 1-7), y tres bandas anchas (0.3-0.7 μm , 0.7-5.0 μm y 0.3-5.0 μm), en el cenit solar del mediodía (MCD43A3)^[8,28,96].

El Black-Sky Albedo es definido como la ausencia de un componente difuso y es una función del ángulo del cenit solar; el White-Sky Albedo se define como albe-

do en la ausencia de un componente directo cuando el componente difuso es isotrópica ^[109].

El producto MOD43A1/B1 de denomina parámetros del modelo de albedo y pueden ser utilizados con un polinomio sencillo para calcular el Black-Sky Albedo:

$$A_{bs} = (f_{iso}(\lambda)g_{0,iso}, g_{1,iso}\theta_i^2 + g_{2,iso} + \theta_i^3) \\ (f_{vol}(\lambda)(g_{0,vol}, g_{1,vol}\theta_i^2 + g_{2,vol} + \theta_i^3) + \\ (f_{geo}(\lambda)(g_{0,geo}, g_{1,geo}\theta_i^2 + g_{2,geo} + \theta_i^3))$$

Y el White-Sky Albedo:

$$A_{ws} = f_{iso}(\lambda)g_{iso} + f_{vol}(\lambda)g_{vol} + f_{geo}(\lambda)g_{geo}$$

Con sus determinados coeficientes que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes del polinomio para black-sky albedo y white-sky albedo. Fuente Schaafl^[96].

	Termino	Isotrópico (iso)	RossThick (vol)	LiSparseR (geo)
Black-Sky Albedo	g ₀	1.0	-0.007574	-1.284909
	g ₁	0.0	-0.070987	-0.166314
	g ₂	0.0	-0.307588	0.041840
White-Sky Albedo	Integral g	1.0		-1.377622

El algoritmo de BRDF/Albedo se basa en una combinación de *RossThick-LiSparseReciprocal kernels*, como un modelo semiempírico usado para integrar de valores de 16 días, correcciones atmosféricas, resolución de 500 m, datos de la superficie de reflectancia direccional de MODIS. Para un ajuste de BRDF de cada píxel de la superficie terrestre. Se calculan los valores del ancho de banda (longitud de onda), utilizando datos combinados de los instrumentos de MODIS (Terra y Aqua). El SKDBRM se representa la suma ponderada de un parámetro isotrópico (f_{iso}) y dos funciones de visualización (f_{vol}), y geometría de iluminación (f_{geo}), K_{vol} se

deriva de la dispersión de volumen de modelos de transferencia radiactiva, mientras K_{geo} se deriva de la dispersión de la superficie y la teoría de proyección de la sombra geométrica. Los parámetros BRDF (f_{iso} , f_{vol} , f_{geo}), son calculados en el producto operacional a partir de las ponderaciones que dependen de los espectros de cada uno de estos parámetros de la formación de la reflectancia total [96]:

$$R = f_{iso} + f_{vol}K_{vol} + f_{geo}K_{geo}$$

Los subproductos se muestran en la Tabla 6. Para más información sobre éste producto ver Schaaf [96] y Strahler [109].

Tabla 6. Subproductos de MOD43 y características. Fuente: García Mora y Francois [28].

Subproducto	Resolución temporal	Resolución espacial	Nivel de procesamiento	Tamaño de archivo (MB)
MOD43A1_I2	16 días	500 m	L3	41
MOD43A2	16 días	500 m	L3	1
MOD43A3	16 días	500 m	L3	31
MOD43A4	16 días	500 m	L3	16
MOD43B1	16 días	1 km	L3	11
MOD43B2	16 días	1 km	L3	0.4
MOD43B3	16 días	1 km	L3	9
MOD43B4	16 días	1 km	L3	4
MOD43C1	16 días	0.05°	L3	231
MOD43C2	16 días	0.05°	L3	137
MOD43C3	16 días	0.05°	L3	185
MOD43C4	16 días	0.05°	L3	83

Capítulo 3. Propuesta Metodológica

Como se ha mencionado anteriormente (Sección 1.3), este trabajo consiste en el desarrollo de una metodología para determinar las zonas propensas a desertificación mediante la integración de variables biofísicas y antropogénicas obtenidas, principalmente, del sensor MODIS, cartografía temática y datos estadísticos, utilizando técnicas de evaluación multicriterio y Tecnologías de la Información Geográfica.

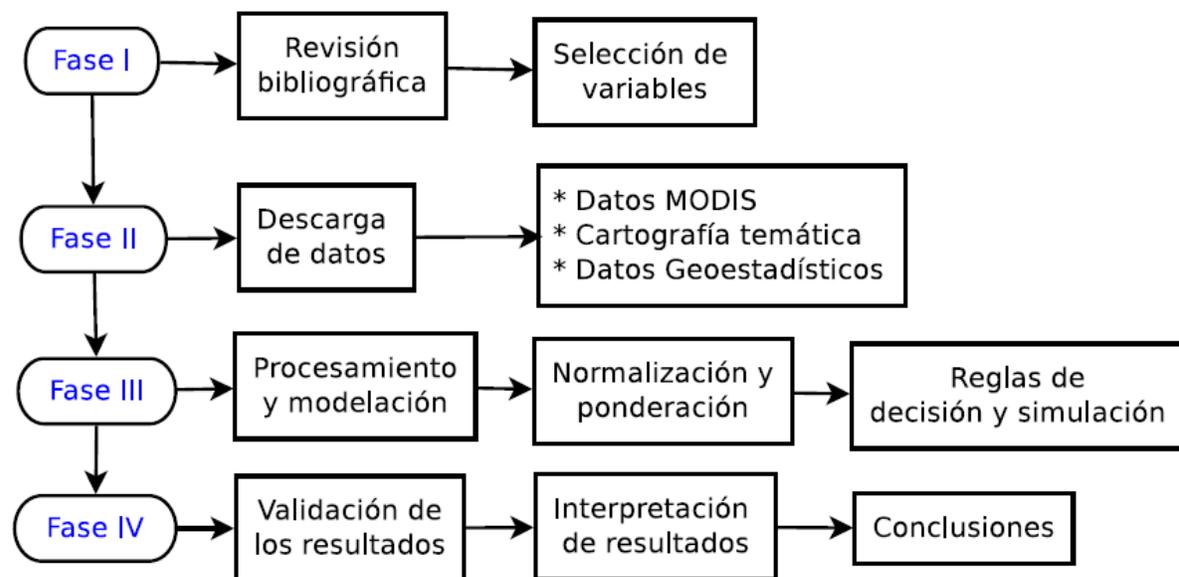


Figura 7. Esquema metodológico.

El trabajo de metodológico se plantea en cuatro fases (Figura 7). La primera fase (Fase I) corresponde a una revisión bibliográfica que permitió definir un marco teórico y seleccionar los indicadores y/o factores inductores de la desertificación para el Estado de Sinaloa. La fase II comprendió la obtención, análisis y preparación de la información geoespacial (datos MODIS, cartografía temática y geoestadística). Una vez obtenidas las bases de datos espaciales (2003 y 2012) se realizó el procesamiento y modelación de todas las variables, su normalización y ponderación utilizando el proceso analítico jerárquico (AHP), y se generó la regla de decisión para su simulación mediante la sumatoria lineal ponderada (Fase III). Por último, la fase

IV consiste en validar los resultados, interpretarlos y realizar conclusiones al respecto.

3.1. Objeto de estudio: El territorio de Sinaloa

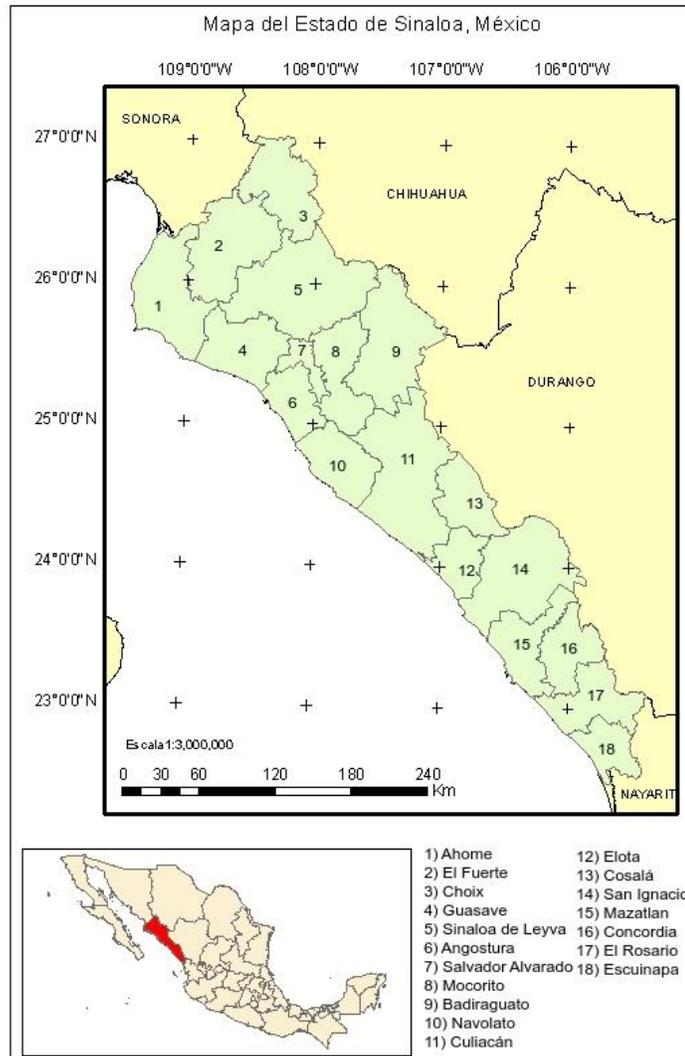


Figura 8. Mapa del área de estudio correspondiente al Estado de Sinaloa, México. Elaboración propia.

El Estado de Sinaloa se encuentra ubicado en la parte noroeste de México, específicamente en la costa del Golfo de California, colinda con el Estado de Sonora

al Norte, Chihuahua y Durango al Este, al Sur con el Estado de Nayarit y al Oeste con el Océano Pacífico (Figura 8).

Contiene una superficie total 5,732,962 has., representando el 2.9% de la superficie del país. El Estado se encuentra ubicado a 27°02' y 22° 29' latitud norte y 105° 23' y 109° 25' latitud oeste, por su localización geográfica cuenta con 656 km. de litoral en el Océano Pacífico y en el Golfo de California; posee una superficie de 222,000 ha de lagunas litorales. De acuerdo con el último censo realizado en el año 2010 el Estado presenta una población de 2,767,761 habitantes distribuidos en sus 18 municipios.

El Estado de Sinaloa se divide en 3 zonas: norte, centro y sur. La zona norte se encuentra integrada por los municipios de Ahome, El Fuerte, Choix, Guasave y Sinaloa de Leyva. La zona centro por los municipios de Salvador Alvarado, Angostura, Mocorito, Navolato y Culiacán. Por último, la zona sur está constituida por los municipios Cósala, Elota, San Ignacio, Mazatlán, Concordia, El Rosario y Escuinapa.

Los climas del Estado se muestran en la Tabla 7. La temperatura media anual es en promedio de 24.86°C, con precipitaciones media acumuladas de 674.44 mm anuales. Dispone de 19 corrientes y 7 cuerpos de agua. Los principales tipos de vegetación son: pastizales, bosques, selvas, matorrales, agricultura, entre otros ^[53].

Tabla 7. Superficie de Sinaloa por tipo de clima. Fuente: INEGI ^[53].

Tipo o subtipo	Porcentaje de territorio
Cálido subhúmedo con lluvias en verano	37.14%
Semiseco muy cálido y cálido	21.27%
Seco muy cálido y cálido	18.56%
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	11.02%
Muy seco muy cálido y cálido	9.78%
Templado subhúmedo con lluvias en verano	2.6%

3.2. Datos y Metodología

Con el fin de identificar y estudiar las zonas propensas o vulnerables a desertificación en el Estado de Sinaloa, México, se seleccionaron algunos indicadores de aspectos ambientales, antropogénicos, humedad y vegetación de acuerdo con la revisión bibliográfica. Se seleccionó dos años de estudio (2003 y 2012). Al comparar ambos años permite determinar la variación de este fenómeno tanto la metodología empleada.

Dentro de dichas variables se tienen datos que pueden ser obtenidos a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS y otras de cartografía temática oficial del INEGI, mismos indicadores que han sido utilizados y mencionados en otros estudios como principales agentes catalizadores en el proceso (Tabla 8).

Asimismo, se elaboró un mapa de restricción mediante el mapa de división política de Sinaloa, las zonas marítimas, redes hidrológicas, carreteras y asentamientos humanos para los años 2003 y 2012.

Debido a las diferentes proyecciones de coordenadas de los datos, las variables anuales fueron transformadas a la proyección UTM-13N; asimismo la resolución espacial de los datos se cambió a un aproximado de 250 m.

3.2.1. Sumatoria lineal ponderada

Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) implementadas en SIG se utilizan como una herramienta de modelación de procesos ^[22]. Existe una gran variedad de métodos o técnicas de EMC que se diferencian básicamente en los procedimientos aritméticos-estadísticos. Cada método cuenta con una serie de características, requerimientos, propiedades, tipo de evaluación, tipos de datos a considerar, las características de los objetivos y capacidad de los sistemas informáticos que los definen individualmente ^[33].

Tabla 8. Jerarquía entre criterios y factores.

Criterio	Descripción	Factores
Ambiental	Factores bióticos y abióticos que pueden influir en el equilibrio de los ecosistemas en forma directa e indirecta	Aumento de albedo Disminución de biomasa Temperatura superficial
Antropogénicos	Factores relacionados con toda actividad humana.	Cercanía a asentamientos humanos Cercanía a carreteras Cercanía a zonas agrícolas
Humedad	Factores relacionados con el agua en el ambiente.	Contenido de humedad en el suelo Lejanía a redes hidrológicas Precipitación
Suelo	Factores perjudiciales del suelo e influyentes en el desarrollo de desertificación	Zonas cercanas a degradación física Zonas cercanas a degradación química Zonas cercanas a erosión eólica Zonas cercanas a erosión hídrica
Vegetación	Factores relacionados directamente con la densidad de la vegetación	Índice de vegetación (NDVI) Deforestación Suelos sin o con escasa vegetación

Para determinar las zonas propensas a desertificación se utilizó como técnica de EMC a la sumatoria lineal ponderada, ampliamente utilizada en la toma de decisiones a nivel geoespacial. Con esta técnica la obtención del nivel de adecuación de cada alternativa se obtiene sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso, de manera sencilla, intuitiva y fácil de implementar:

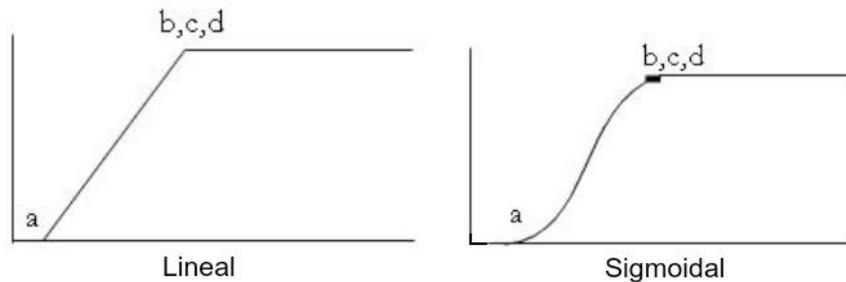
$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Dónde: r_i es el nivel de adecuación del factor i ; w_j es el peso del criterio (j); v_{ij} es el valor ponderado del factor i en el criterio j .

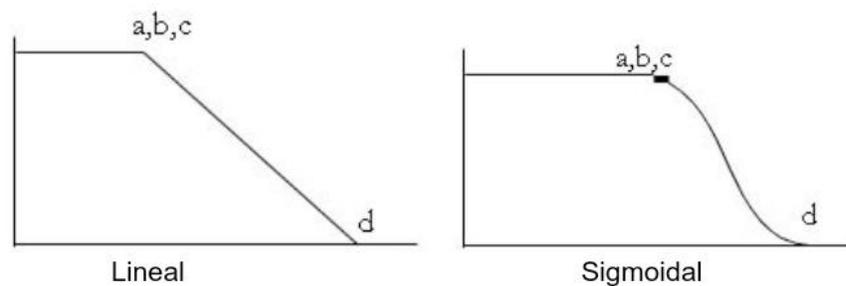
3.2.2. Normalización

Para la homogenización de las diferentes unidades de medida entre las variables, se realizó una normalización a una escala de 0-255 para generar factores finales (Tabla 9). Para ello, se aplicaron operadores borrosos (*fuzzy*), en funciones lineales y sigmoidales implementados en el módulo FUZZY en el *software* IDRISI, las cuales se ilustran a continuación:

- *Función monótonicamente creciente*: se eleva de 0 a 1 y nunca disminuye.



- *Función monótonicamente decreciente*: comienza en 1, luego disminuye a 0 pero nunca crece.



Aquellas variables que se implementaron funciones lineales son las que se realizaron algún otro proceso tal como la obtención de distancias. Por otro lado, las funciones sigmoidales se aplicaron a las variables que se trabajó directamente con la información.

Tabla 9. Normalización de variables. Elaboración propia.

Criterio	Factores	Función	Tipo	Asignación 0	Asignación 255
Ambiental	Aumento de albedo	Lineal	Creciente	0	MAX
	Disminución de bio-masa	Lineal	Creciente	0	MAX
	Temperatura superficial	Sigmoidal	Creciente	0	MAX
Antropogénicos	Cercanía a asentamientos humanos	Lineal	Decreciente	MAX	0
	Cercanía a carreteras	Lineal	Decreciente	MAX	0
	Cercanía a zonas agrícolas	Lineal	Decreciente	MAX	0
Humedad	Contenido de humedad en el suelo	Lineal	Creciente	1	0
	Lejanía a redes hidrológicas	Lineal	Creciente	0	MAX
	Precipitación	Sigmoidal	Decreciente	MAX	0
Suelo	Zonas cercanas a degradación física	Lineal	Decreciente	MAX	0
	Zonas cercanas a degradación química	Lineal	Decreciente	MAX	0
	Zonas cercanas a erosión eólica	Lineal	Decreciente	MAX	0
	Zonas cercanas a erosión hídrica	Lineal	Decreciente	MAX	0
Vegetación	Índice de vegetación (NDVI)	Sigmoidal	Decreciente	0.6	0.1
	Deforestación	Lineal	Creciente	0	1
	Suelos sin o con escasa vegetación	Lineal	Creciente	0	1

MAX: Valor máximo de la variable.

3.2.3. Ponderación de criterios y factores: análisis jerárquico

Para la ponderación de criterios y factores se buscó que el modelo de zonas propensas a desertificación cumpliera con los principales agentes que inciden en el proceso, tratando de manera jerárquica el impacto de criterios y de los factores según su nivel de importancia dentro del proceso de desertificación. Cada uno de los criterios refleja la importancia de los diferentes entes participativos en este proceso y que son presentados por una serie de factores geoespaciales. Para ello, se tuvo en cuenta la información derivada de la revisión bibliográfica y consulta de expertos.

A partir de esto se procedió a la ponderación de los criterios y de los factores utilizando el método de comparación por pares de Saaty para ponderar, el cual establece mediante una matriz de comparación entre pares de criterios o factores comparando el nivel de importancia de cada uno sobre los demás (Figura 9) [33].

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte	Extrema		
Menos importante						Más Importante		

Figura 9. Escala de medida para la asignación de juicios del método de comparación por pares de Saaty. Fuente: Gómez y Barredo [33].

En consecuencia, para la ponderación se consideró de mayor impacto al criterio de suelo continuando antropogénico, humedad, vegetación y ambiental (Tabla 10).

Tabla 10. Jerarquía de importancia de los criterios.

Criterios	1	2	3	4	5
1) Ambiental	1	---	---	---	---
2) Antropogénicos	4	1	---	---	---
3) Humedad	3	0.75	1	---	---
4) Suelo	5	1.25	1.67	1	---
5) Vegetación	2	0.5	0.66	0.4	1

Los factores dentro de cada criterio, se le asignó un nivel de importancia respecto al fenómeno y se muestra a continuación:

- a) Ambiental: es integrado por tres factores, siendo de mayor importancia el aumento de albedo, seguido de la disminución de biomasa y temperatura superficial (Tabla 11).

Tabla 11. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio ambiental.

Factores	1	2	3
1) Aumento de albedo	1	---	---
2) Disminución de biomasa	0.5	1	---
3) Temperatura superficial	0.33	0.5	1

- b) Antropogénicos: dentro de este criterio se consideró de mayor importancia la cercanía a zonas agrícolas, seguidos por los factores de cercanía a asentamientos humanos y cercanía a carreteras (Tabla 12).

Tabla 12. Jerarquía de importancia de los factores antropogénicos.

Factores	1	2	3
1) Cercanía a asentamientos humanos	1	---	---
2) Cercanía a carreteras	0.5	1	---
3) Cercanía a zonas agrícolas	2	4	1

- c) Humedad: en este criterio, los factores de mayor a menor importancia son aridez, hidrografía, precipitación y contenido de humedad (Tabla 13).

Tabla 13. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio climático.

Factores	1	2	3
1) Lejanía a redes hidrológicas	1	---	---
2) Precipitación	0.5	1	---
3) Contenido de humedad en el suelo	0.33	0.5	1

- d) Suelo: La importancia de estos factores es de acuerdo al tipo de afectación, considerando como de mayor importancia la degradación (física y química) y después la erosión (hídrica y eólica).

Tabla 14. Jerarquía de importancia de los factores en el criterio de suelo.

Factores	1	2	3	4
1) Zonas cercanas a degradación física	1	---	---	---
2) Zonas cercanas a degradación química	1	1	---	---
3) Zonas cercanas a erosión eólica	0.5	0.5	1	---
4) Zonas cercanas a erosión hídrica	0.5	0.5	1	1

- e) Vegetación: Este criterio el de mayor importancia es la deforestación, seguido del índice de vegetación y por último los suelos sin o con escasa vegetación.

Tabla 15. Jerárquica de importancia de los factores en el criterio de vegetación.

Factores	1	2	3
1) Cubierta vegetal (NDVI)	1	---	---
2) Deforestación	0.5	1	---
3) Suelos sin o con escasa vegetación	0.33	0.5	1

Para la obtención de los pesos de los criterios y factores se utilizó el módulo WEIGHT de IDRISI, en el cual se introducen los niveles de importancia de los criterios y factores para obtener los pesos correspondientes.

Finalmente y siguiendo con el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso final de cada factor, multiplicando el peso otorgado a cada uno de ellos, nivel (criterios) por nivel (factores).

3.3. Obtención de variables

3.3.1. Procedimiento para generar las variables del sensor MODIS

El procesamiento se realizó aplicando un algoritmo general para obtener cada una de las variables de los años 2003 y 2012, con ciertas particularidades en algunos casos. Los productos descargados y seleccionados (Tabla 16), se encuentran en la nomenclatura (*tile*) H08V06.

Tabla 16. Productos utilizados del sensor MODIS.

Producto	Atributo	Resolución temporal – espacial	Factor de escala	Indicador
MOD11A2	Temperatura y emisividad de la superficie	8 días / 1 km	0.02	Temperatura superficial
MCD12Q1	Tipos de cobertura de suelo	1 año / 500 m	-----	Cambios de cobertura; cercanía a zonas agrícolas y zonas urbanas
MOD13Q1	Índices de vegetación	16 días / 250 m	0.0001	NDVI
MOD17A2	Fotosíntesis neta y productividad primaria	8 días / 1 km	0.0001	Escasa vegetación; disminución de biomasa
MCD43A3	Albedo	16 días / 500m	0.0010	Aumento de albedo

Dicho proceso se realizó de la siguiente manera (Figura 10):



Figura 10. Esquema metodológico para factores de MODIS.

- 1) Descarga de los productos MODIS TERRA y MODIS COMBINED desde el sitio web: http://lpdaac.usgs.gov/get_data/data_pool.
- 2) Importación y conversión de los archivos de formato HDF a formato ráster de Idrisi con el módulo MODISCONV.
- 3) Creación de un grupo de imágenes ráster en Idrisi (RASTER GROUP), que permite trabajar las imágenes en un solo conjunto en el módulo MACRO MODELER.
- 4) Elaboración y aplicación de la máscara para cada variable.
- 5) Diseño y ejecución de un modelo multipasos mediante el módulo MACRO MODELER. Compuesto en las siguientes subfases:
 - a) Delimitación del área de estudio mediante los comandos WINDOWS Y OVERLAY.
 - b) Aplicación del factor de escala y filtro de cuadro adaptable (ver sección 3.3.5.).
 - c) Generación de la variable anual a partir del conjunto de imágenes de cada año de estudio, realizando un promediado de imágenes en la mayoría de los casos (excepción de disminución de biomasa).
 - d) Proyección cartográfica de las imágenes sinusoidal a UTM-13N (Figura 11).
 - e) Solo para las variables de agricultura, carretera e hidrología, se obtuvieron sus distancias con el módulo DISTANCE.
 - f) Ya con todos los indicadores obtenidos se realizó una homogenización de valores a partir de la normalización.

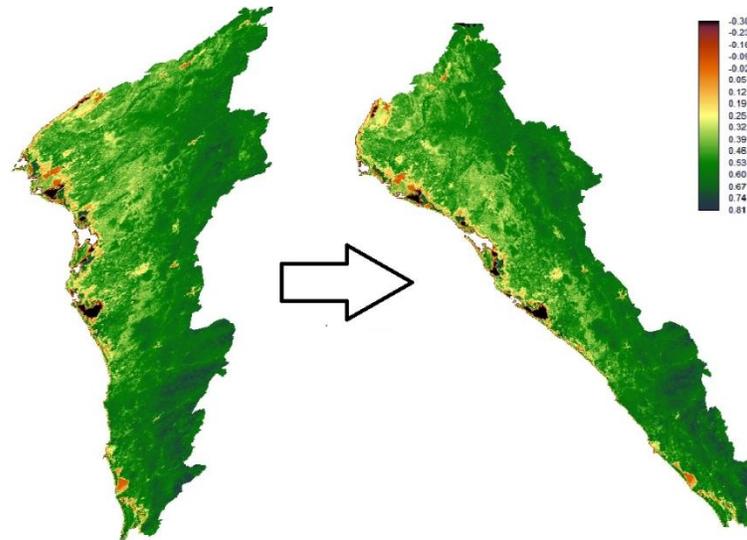


Figura 11. Ejemplo de proyección sinusoidal a proyección UTM-13N de la variable índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), año 2012.

3.3.2. Procedimiento para generar variables de origen temático

Como variables auxiliares se utilizó la cartografía temática del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para los factores de asentamientos humanos, carreteras y redes hidrológicas.

El procesamiento se realizó de la siguiente manera:

- 1) Descargas de los archivos vectoriales de INEGI (Tabla 17), delimitación del área de estudio y asignación de la proyección UTM-13N con ArcGIS.
- 2) Importación de los archivos vectoriales en Idrisi Selva.

Tabla 17. Factores obtenidos de INEGI

Factor	Indicador	Vectorial
Cercanía a asentamientos humanos	Distancia a asentamientos humanos	Localidad urbana y topónimos
Cercanía a carreteras	Distancia a carreteras	Carreteras
Lejanía a redes hidrológicas	Distancia a redes hidrológicas	Corrientes de agua y cuerpos de agua

3) Rasterización de los archivos vectoriales con el módulo RASTERVECTOR. Para ello se define el número de filas y columnas, a partir de los límites del área de estudio mediante las siguientes ecuaciones:

$$Columnas = \frac{XMax - Xmin}{R}$$
$$Filas = \frac{YMax - Ymin}{R}$$

Dónde: $XMax$ y $Xmin$ son las coordenadas máximas y mínimas en el eje X; $YMax$ y $Ymin$ son las coordenadas máximas y mínimas en el eje Y; R es la resolución que se desea para la imagen ráster.

Para las coordenadas en los ejes X y Y, se utilizó un vectorial con los municipios de Sinaloa mostrando las siguientes coordenadas³:

- $Xmin$: 54450.9335938 m.
- $XMax$: 459829.7500000 m.
- $Ymin$: 2484638.7500000 m.
- $YMax$: 2995691.0000000 m.

3.3.3. Procedimiento para generar variables geoestadísticas

Para diseñar ésta variable se utilizaron las base de datos pluviométricos de las estaciones meteorológicas existentes en el Estado de Sinaloa, correspondientes a la base de datos climáticos del noroeste de México del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California (CICESE), y el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (peaccBC); del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); y del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD).

La precipitación es el producto de la condensación atmosférica, que puede ser sólida o líquida y a su vez es un elemento muy importante del clima, ya que determina las condiciones del medio ambiente tales como seco y húmedo ^[93].

³ Las coordenadas de $Xmin$, $XMax$, $Ymin$ y $YMax$, fueron tomados de acuerdo al metadato del vectorial de Sinaloa y a partir de éste se generaron las imágenes ráster.

Para diseñar la variable se descargaron los datos de las estaciones meteorológicas para ambos años (2003 y 2012). Éste proceso se dio en las siguientes fases:

- 1) Descarga de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas y almacenamiento en hojas de Excel.
- 2) Uso del *software* ArcGIS para la visualización y proyección de los puntos en forma espacial y creación del archivo vectorial para cada año.
- 3) Importación a Idrisi con el módulo DATABASE WORKSHOP.
- 4) Interpolación con el módulo INTERPOL para generar una imagen ráster con los valores de las estaciones meteorológicas.
- 5) Por último, aplicación de la máscara para delimitar la variable precipitación al territorio de Sinaloa.

3.3.4. Procedimiento de los factores

Criterio ambiental

a) Aumento de albedo

Como se mencionó en el marco teórico, el albedo es uno de los más importantes indicadores en estudios de desertificación. Su incremento implica una degradación de suelos.

Para la variable de aumento de albedo, se utilizó la imagen de la banda en el dominio de onda corta (*shortwave*: 0.3-5.0 μm) eliminando aquellas imágenes con falta de información debido a la época de lluvias.

Para obtener dicha variable, se utilizaron dos imágenes, una de un año anterior y otra del año de estudio. Se definió un enunciado lógico para determinar los píxeles que disponen de un aumento en comparación de ambos años. El enunciado fue:

$$A_a \leftrightarrow I_t > I_{t-1}$$

El aumento de albedo (A_a), está dado si y solo si la imagen actual (I_t) es mayor que la imagen precedente (I_{t-1}).

Para cumplir éste enunciado lógico se realizó una operación de resta:

$$A(x, y) := I_a(x, y) - I_p(x, y)$$

Dónde: $A(x, y)$ es la imagen de aumento de albedo y está definida por la diferencia de la imagen actual $I_a(x, y)$ y la imagen de un año anterior $I_p(x, y)$.

La normalización fue con la función sigmoideal de tipo creciente, considerando los valores mínimos (0) y los valores máximos de cada año ($\text{Max}_{2003} = 0.076$ y $\text{Max}_{2012} = 0.11$).

b) Disminución de biomasa

La producción de biomasa se relaciona directamente con la fotosíntesis o los ciclos de nutrientes y con el ciclo del agua ^[101].

Cuando existe una emisión neta de CO_2 a la atmósfera, es debido a un cambio en el uso del suelo de tal forma que las reservas de biomasa disminuyen (por ejemplo, causas de deforestación o sequías). El CO_2 también es emitido por la biomasa, pero la cantidad emitida es luego reabsorbida cuando la vegetación crece de nuevo [4].

Para la variable de disminución de biomasa, se utilizó dos imágenes, una del año de estudio y otra de un año anterior a partir del producto MOD17A2. El enunciado lógico para determinar la disminución de biomasa es:

$$D_b \leftrightarrow I_t < I_{t-1}$$

La disminución de biomasa (D_b), está dado si y solo si la imagen actual (I_t) es menor que la imagen precedente (I_{t-1}).

Para cumplir con este enunciado lógico se realizó una operación de resta:

$$D(x, y) := I_p(x, y) - I_a(x, y)$$

Dónde: $D(x, y)$ es la imagen de disminución de biomasa y está definida por la diferencia de la imagen de un año anterior $I_p(x, y)$ y la imagen actual $I_a(x, y)$.

La normalización se realizó con una función lineal de tipo creciente, considerando como valor mínimo el 0 y el máximo ($MAX_{2003} = 0.014$ y $MAX_{2012} = 0.017$).

c) Temperatura superficial

La temperatura es un elemento climático que refleja el estado energético del suelo, en términos estrictamente meteorológicos. La temperatura mide la cantidad de energía del aire en las capas más bajas de la tropósfera en donde ocurre la vida, el suelo, al ser sólido tiene otros coeficientes de transferencia de calor y por lo tanto su parametrización es diferente a la de la atmósfera, traduciéndose en un determinado nivel de calentamiento, es decir, indicando el grado de calor o de frío. La temperatura es una limitante fundamental para la dispersión natural de las especies tanto vegetales como animales, afectando el desarrollo y crecimiento si tiene variaciones extremas y el desarrollo de las plantas a través de su influencia sobre la velocidad de los procesos metabólicos ^[93].

Para obtener información de temperatura se utilizó el producto MOD12A2, se eliminaron aquellas imágenes continuaron con una máscara de nubes. Por último, se realizó una conversión de temperatura de grados Kelvin a grados Celsius:

$$^{\circ}C = ^{\circ}K - 273.15$$

La normalización de este factor se consideró la temperatura mínima registrada en las estaciones meteorológicas, para ello se utilizó la información proporcionada de "Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Sinaloa" por Ruíz *et al.* (2005)^[93]. La estación que registró la temperatura media mínima es Las Cañas, El Fuerte, con 11.2°C con una medición de 38 años (1961-1998). Para el valor máximo, se tomó en cuenta la mayor temperatura en las imágenes ($MAX_{2003} = 37.13^{\circ}C$ y $MAX_{2012} = 40.01^{\circ}C$).

Criterio antropogénico

a) Cercanía a asentamientos humanos

Para modelar este factor se utilizó los datos obtenidos de MODIS e INEGI para integrarlos en una sola variable que represente los asentamientos humanos en Sinaloa.

Por parte del sensor de MODIS se seleccionó el producto MOD12Q1, dado que contiene información de zonas urbanas y construidas dentro de la clasificación de la Universidad de Maryland. Asimismo, a partir de los archivos vectoriales de INEGI las localidades urbanas y topónimos, se generó un vectorial. Posteriormente, se integraron ambas fuentes en una variable denominada asentamientos humanos y se obtuvo un mapa de distancias a dichas superficies.

Por último, se realizó una normalización con una función lineal de tipo decreciente, el valor mínimo (0) fue la máxima distancia (MAX_{2003} y $MAX_{2012} = 61.13$ km) y el valor máximo (255) a los asentamientos humanos.

b) Cercanías a carreteras

Las carreteras o vías de comunicación juegan un papel importante en la movilidad y desarrollo de las actividades económicas y sociales del ser humano. No obstante, también pueden ser obstáculo o barrera en la migración de ciertas especies animales, perturbar el crecimiento continuo de la vegetación natural, la pérdida y alteración de los ecosistemas, así como también la alteración del manto freático ^[103].

Al ser un factor que puede desarrollar directa y/o indirectamente factores antropogénicos que llevan como consecuencia pérdidas de cubierta vegetal. Es por ello que es importante considerar la distancia a las vías de comunicación como un factor preponderante para mantener o perturbar el estado hídrico de los suelos. De tal manera que se ha dispuesto de la cartografía de INEGI en formato vectorial para modelar el factor de accesibilidad o lejanía a los siguientes tipos de vías de comunicación: pavimentada de cuota de 2 carriles; pavimentada de cuota de 4 carriles; pa-

vimentada libre de 2 carriles; pavimentada libre 4 carriles; pavimentada libre 6 carriles; terracería de 2 carriles; y terracería con acceso restringido.

Por último se realizó una normalización similar a cercanía a asentamientos humanos, donde la distancia máxima para ambos años de 42.14 km.

c) Cercanía a zonas cercanas a agrícolas

Todo país requiere cubrir la demanda de alimentos en su población, por lo que destina áreas de producción, que a su vez puede generar problemas ambientales por malos manejos.

Para la obtención del factor cercanía a zonas agrícolas se utilizó el producto MCD12Q1 (tipos de coberturas de suelo), se seleccionó el sistema de clasificación por la Universidad de Maryland, que permite tener una distribución de coberturas más relacionadas con la zona de estudio.

Las zonas agrícolas se obtuvieron a partir de un valor de relleno, para ello se utilizó una operación lógica:

$$p \leftrightarrow q$$

La zona agrícola está determinado si y solo si el valor del píxel es el valor zonas agrícolas.

Para cumplir este enunciado se utilizó el módulo IMAGE CALCULATOR a partir de la siguiente ecuación:

$$ZA(x, y) := f(x, y) = V_r$$

La imagen de salida es la variable de zona agrícola $ZA(x, y)$, definida por los valores de los píxeles de la imagen de entrada $f(x, y)$ que deben ser igual al valor de tierras de cultivo del producto MCD12Q1 (V_r). El valor es 12, el cual representa los píxeles designados como tierras de cultivo.

Con la variable zonas agrícolas, se obtuvo sus distancias y por último se normalizó de la misma manera que el factor cercanía a asentamientos humanos ($MAX_{2003} = 15.67$ km y $MAX_{2012} = 20.05$ km)

Criterio de humedad

a) Lejanía a redes hidrológicas

En muchas regiones, se presentan sequías que juegan un papel importante en la pérdida de productividad de los suelos, que suelen traer como consecuencias una aceleración de los procesos de desertificación y degradación. Asimismo, la cercanía al recurso hídrico puede ayudar a contrarrestarlas ^[103].

Para esta variable se utilizaron dos mapas temáticos de hidrografía, del cual se seleccionaron los cuerpos de agua perennes y las corrientes permanentes.

Se realizó una sobreposición de ambos mapas para obtener la variable de redes hidrológicas. Posteriormente, se realizó el procesado anteriormente mencionado (rasterización) y se obtuvo sus distancias.

Por último, la normalización se realizó con una función lineal de tipo creciente, considerando los valores mínimos la cercanía a las redes hidrológicas y valores máximos la lejanía a éstos (MAX = 32.67 km para ambos años).

b) Contenido de humedad en el suelo

El contenido de humedad del suelo es un parámetro importante usado en muchas investigaciones en los campos de la meteorología, hidrología y agricultura ^[11,45].

En éste trabajo se utilizó el índice de sequedad temperatura vegetación (TVDI - *Temperature Vegetation Dryness Index*) propuesta por Sandholt *et al.* ^[94]:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{a + b * NVDI - LST_{min}}$$

Dónde: LST es el valor de temperatura que se encuentra en el píxel observado; a y b son parámetros calculados a partir de la relación existente entre LST y $NVDI$ calculados a partir de la regresión lineal; LST_{min} representa la unidad mínima de temperatura de la superficie de la imagen.

Se intercambió el NVDI por EVI, debido a que éste último es mucho mejor estimando las condiciones de humedad del suelo en la mayoría de los casos. Además de presentar ciertas ventajas frente al índice NVDI como la consideración del efecto atmosférico y menor posibilidad de saturación con vegetación muy vigorosa ^[49].

Con la variable generada, se normalizó con una función lineal de tipo creciente. Los valores del TVDI se encuentran dentro del rango de 0 y 1, donde los valores de 0 muestran suelos saturados de agua y 1 suelos carentes de humedad.

c) Precipitación

El procesado para generar esta variable se muestra en la sección 3.3.3. La normalización se realizó con una función sigmoideal decreciente. Los valores máximos de precipitación son 2,355.68 mm para el año 2003 y 1,599.56 mm en el año 2012.

Criterio de suelo

a) Zonas cercanas a degradación y erosión

La degradación y erosión de los suelos es una de las principales causas de los suelos empobrecidos en el país. Además es una de las principales observaciones que se puede realizar a los suelos con para determinar desertificación.

La fuente para generar estos factores es el mapa de degradación de suelos elaborado por SEMARNAT. Se consideró las zonas cercanas a los suelos a degradación física y química, así como también la erosión eólica e hídrica, generando de esta manera 4 factores.

El procesado fue similar para generar variables temáticas. La normalización fue con una función lineal decreciente.

Criterio de vegetación

a) Índice de vegetación

La cubierta vegetal juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico, la temperatura y los ecosistemas. La cubierta vegetal regula en buena medida la temperatura y la humedad del aire, modificando hasta su propio microclima y continuamente adaptándose a cambios climáticos estacionales [19].

Para generar esta variable se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) del producto MOD12Q1, sin aplicar el filtro cuadro adaptativo.

Su normalización se delimitó dentro de los parámetros de 0.1 y 0.6. Esto se debe que en Chuvieco (2008) ^[12], menciona que para las cubiertas vegetales con un valor de 0.1 se puede señalar como un umbral crítico para la vegetación. Por otro lado, valores entre 0.5 a 0.7 se puede considerar como vegetación densa, por lo que se consideró el valor 0.6 como umbral.

b) Deforestación

En todos los ecosistemas en México ocurren transformaciones con diversos propósitos productivos y de ocupación, cambiando así los usos y cubiertas de los suelos.

Para generar la variable de deforestación se obtuvo a partir del producto MCD12Q1, el procesamiento fue:

- 1) Importación de la imagen.
- 2) Reclasificación de los subtipos de bosques con el módulo RECLASS, para obtención de un solo tipo de Bosques.
- 3) Utilización del módulo LAND CHANGE MODELER en IDRISI, delimitándose a la obtención de pérdida de bosques.

Para el uso de éste módulo se requiere de dos imágenes para compararse entre sí y determinar la transición categórica del píxel. Para el caso del año 2003 se

utilizó la imagen del año 2000 como imagen de referencia y para el año 2012 se usó el año 2009.

c) Escasa vegetación

La escasa vegetación se obtuvo a partir de las imágenes MOD17A2 a partir del valor de relleno. Para ello se utilizó una operación lógica:

$$p \leftrightarrow q$$

La zona de escasa vegetación está determinado si y solo si el valor del píxel es el valor de relleno.

Para cumplir este enunciado se utilizó el módulo IMAGE CALCULATOR a partir de la siguiente ecuación:

$$EV(x, y) := V_r$$

La imagen de salida es la variable de escasa vegetación $EV(x, y)$, definida por los valores de los píxeles de la imagen de entrada $f(x, y)$ que deben ser igual al valor de relleno V_r . El valor de relleno para MOD17A2 es 32765, el cual representa los píxeles con escasa vegetación o vegetación desértica.

3.3.5. Filtro de cuadro adaptable

Existen imágenes que disponen de píxeles "No clasificados", sin información o fuera del rango de medición. Para resolver éste problema se aplicó un filtro adaptable (*Adaptative Box*) a partir de módulo FILTER de IDRISI.

El filtro de cuadro adaptable determina localmente dentro de una ventana o máscara específica (3x3, 5x5 o 7x7), el rango de valores del mínimo y máximo basándose en la desviación estándar definida por el usuario. El algoritmo determina si el valor central de la máscara, se encuentra fuera del rango establecido por el usuario, si es así se asume que es ruido y el valor es remplazado por un promedio de los vecinos más próximos o con un valor de cero. Además permite al usuario especificar una varianza de umbral mínima para proteger los valores de los píxeles en las áreas de variaciones muy bajas ^[22].

En la aplicación del filtro adaptable, la desviación estándar que se aplicó fue de valor 3, esto fue obtenido a partir de una imagen considerada como aquella que no dispone de píxeles con información faltante y no exceda el rango de medida. Para la obtención del valor se realizó un experimento que consiste en ir cambiando los valores de desviación estándar entre 0.00, 0.05, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.5 y 4.0. Para validar el resultado se compararon ambas imágenes:

$$d(x, y) = -g(x, y)$$

Dónde: $d(x, y)$ es la imagen de salida y todos los valores deben de ser 0; $f(x, y)$ es la imagen seleccionada; $g(x, y)$ es la imagen que se aplicó el filtro adaptativo. En el resultado toda matriz ($d(x, y)$) debe tener valor 0, verificado en su histograma. A partir de la desviación estándar de 3 no se presentó variación en ambas imágenes.

3.4. Validación de resultados

Para dar robustez a los resultados obtenidos de los modelos geoespacial planteado se procedió a realizar una validación del Índice de Zonas Propensas a Desertificación (IZPD) considerando cuatro aspectos diferentes:

- 1) Uso de suelo y vegetación: Comparación del mapa IZPD con mapas de uso de suelo y vegetación del producto MCD12Q1 de MODIS en los años 2003 y 2012. Asimismo se utilizó el índice de NDVI como parámetros de exposición del suelo para ambas fechas.
- 2) Climas y humedad: Comparación del mapa índice de zonas propensas a desertificación con mapas climáticos de instituciones como INEGI.
- 3) Índice de aridez: Comparación del mapa IZPD con el índice de aridez de DeMartonne.
- 4) Degradación: Comparación del mapa IZPD con el mapa de intensidad de degradación de SEMARNAT y el Colegio de Posgraduados obtenido del portal de CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

Para la validación se tomó como referencia los valores medios del mapa IZPD de acuerdo con la categoría analizada y priorizada a ser las más susceptibles a desertificar.

3.4.1. Validación con mapas de uso de suelo y vegetación e índice de vegetación

Se utilizó el producto anual MCD12Q1 de uso de suelo y vegetación que ofrece MODIS. A partir de este mapa se determinó los valores mínimos, máximos y la media estadística del IZPD para cada una de las categorías.

Asimismo, se utilizó el producto MOD13Q1, usando el NDVI. Los valores bajos de ambos índices representan ser más susceptibles al fenómeno, se determinó la relación entre ellos, esperando una correlación alta negativa.

3.4.2. Validación con mapas de climas

A partir del mapa de climas se extrajo el valor medio de aptitud (vulnerabilidad) del mapa de zonas propensas a desertificación por tipo de clima, obteniendo aquellos climas con mayor vulnerabilidad, bajo la hipótesis de que los valores mayores resultarán en los climas más áridos.

3.4.3. Validación con mapas de aridez

También para la validación de este parámetro se elaboró un mapa del índice de aridez para ambas fechas (2003 y 2012), generado a partir de las variables de Temperatura y Precipitación mediante la ecuación de DeMartonne:

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Dónde: P es precipitación acumulada anual y T es temperatura media anual.

Finalmente, se obtuvo un mapa continuo donde los valores más pequeños son más propensos a desertificación, por lo tanto se realizó una correlación con el IZPD, esperando obtener una correlación negativa a partir de una regresión lineal.

3.4.4. Validación con mapa de intensidad de degradación

El mapa de intensidad de degradación de suelos fue extraído del mapa degradación del suelo causada por el hombre, escala 1:250,000, generada por la Dirección General Forestal y de Suelos y el Colegio de Posgraduados en el periodo 2001-2002.

A partir de dicho mapa se obtuvieron los valores medios del IZPD de los cuatro niveles de degradación presentada: ligero, moderado, fuerte y extremo.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Variables y factores generados

4.1.1. Máscara de restricción

Para excluir de la simulación del modelo, se descartaron las áreas donde el fenómeno de desertificación no se presenta, tales como: zonas urbanas, vías de comunicación y la red hidrográfica, obteniendo como resultado el mapa de restricciones mostrado en la Figura 12.

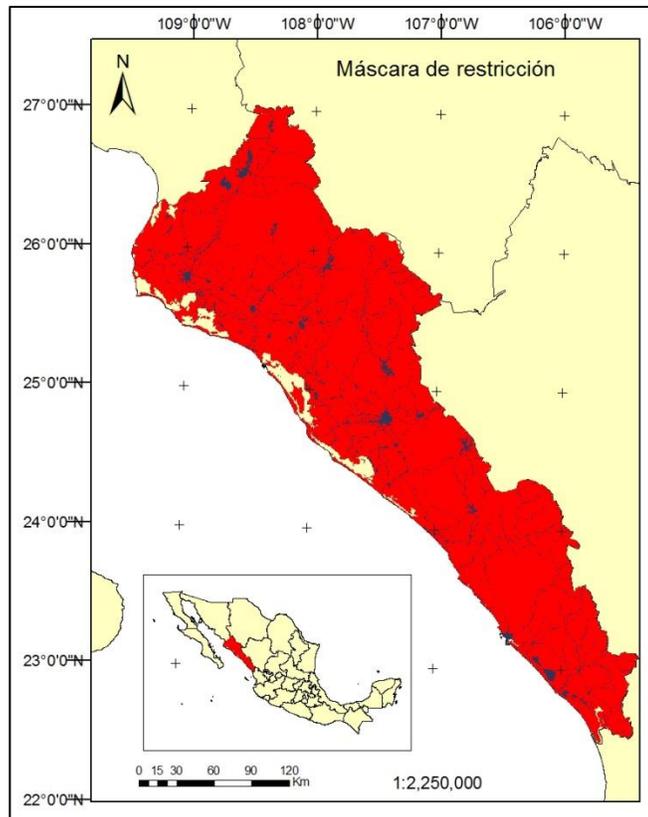


Figura 12. Mapa de restricción en el área de estudio.

4.1.2. Criterio ambiental

Aumento de albedo

En el año 2003, la distribución de valores se presentó gran parte en los municipios costeros y parte de la sierra en la zona sur del Estado. Para el caso del año 2012, las áreas disminuyen, enfocándose cada vez más cerca de las costas y en formas esporádicas en la sierra (Figura 13).

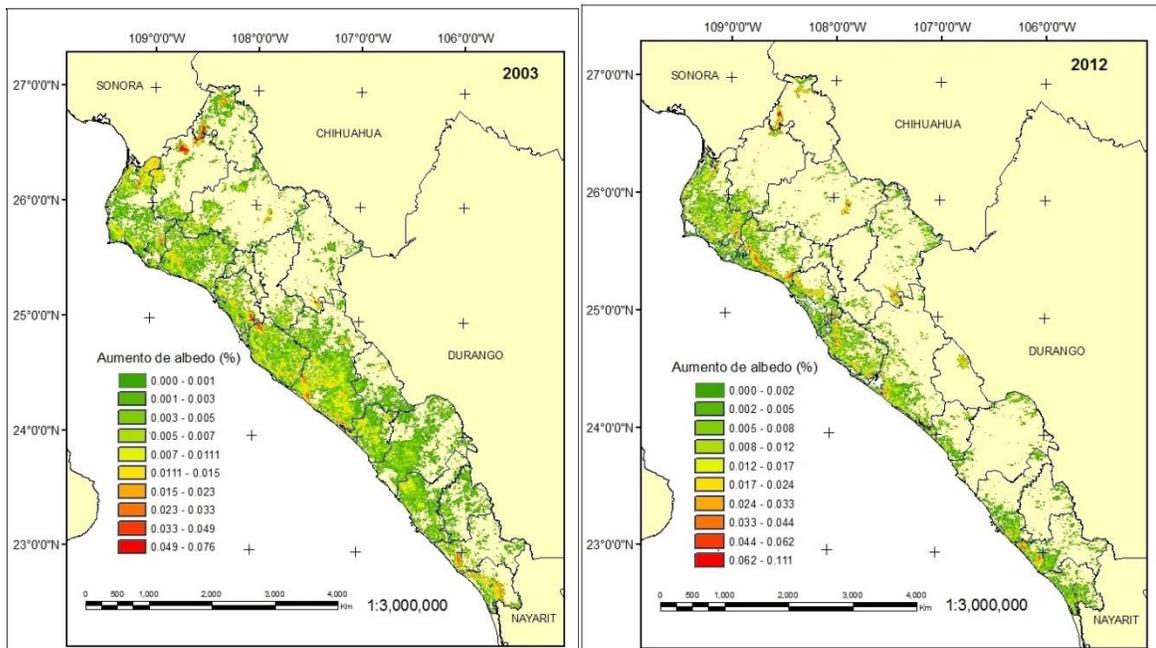


Figura 13. Mapas de aumento de albedo en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

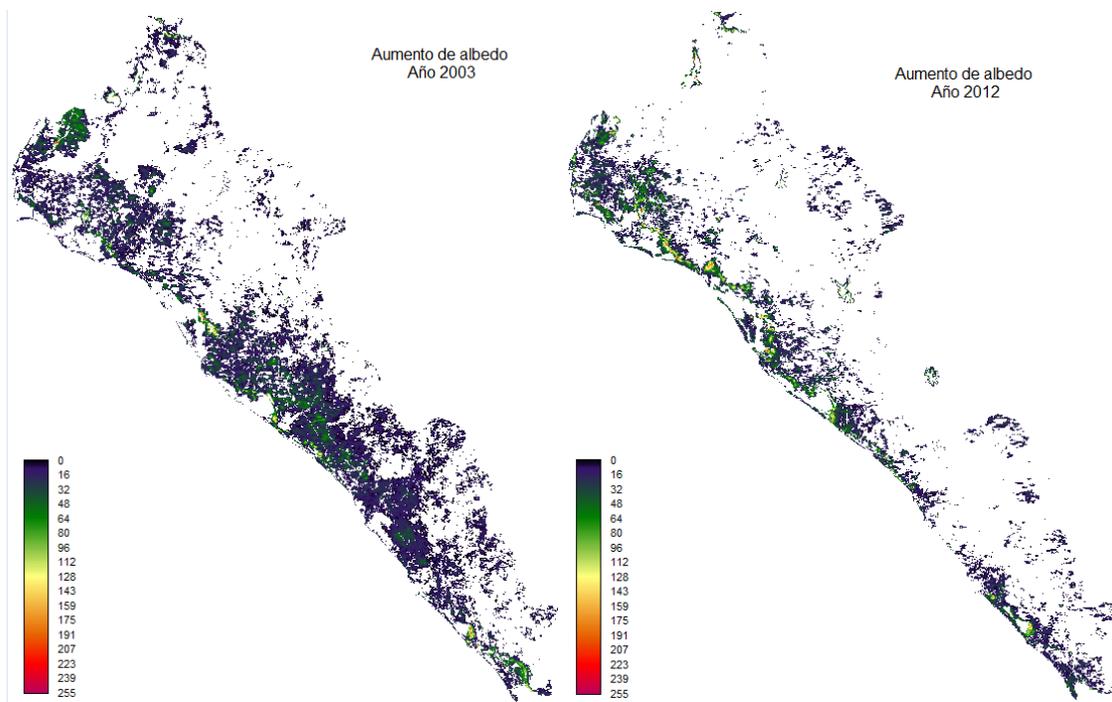


Figura 14. Factores de aumento de albedo en los años 2003 y 2012.

Para la obtención del factor se normalizó la variable mediante una función del tipo lineal creciente (Figura 14). Con la aplicación de la máscara, el valor más alto asignado (255) fue a valores aproximados a 0.014% localizados en los márgenes de cuerpos de agua y cerca de las costas.

Disminución de biomasa

En el año 2003, se presentaron mayores áreas concentradas de disminución de biomasa en los municipios de Ahome y Guasave. Asimismo, la distribución de esta variable se aprecia en forma de corredor cerca de las costas. Los municipios que presentaron disminución son: Angostura, Salvador Alvarado, Navolato y Culiacán. A partir de Culiacán hacia el sur tienen una distribución esporádica, con excepción de los municipios de Mazatlán y Escuinapa. Para el caso del año 2012, se presentan mayores áreas de disminución en los municipios del norte y centro. En la

zona sur disminuye la distribución presentando mayores concentraciones en San Ignacio (Figura 15).

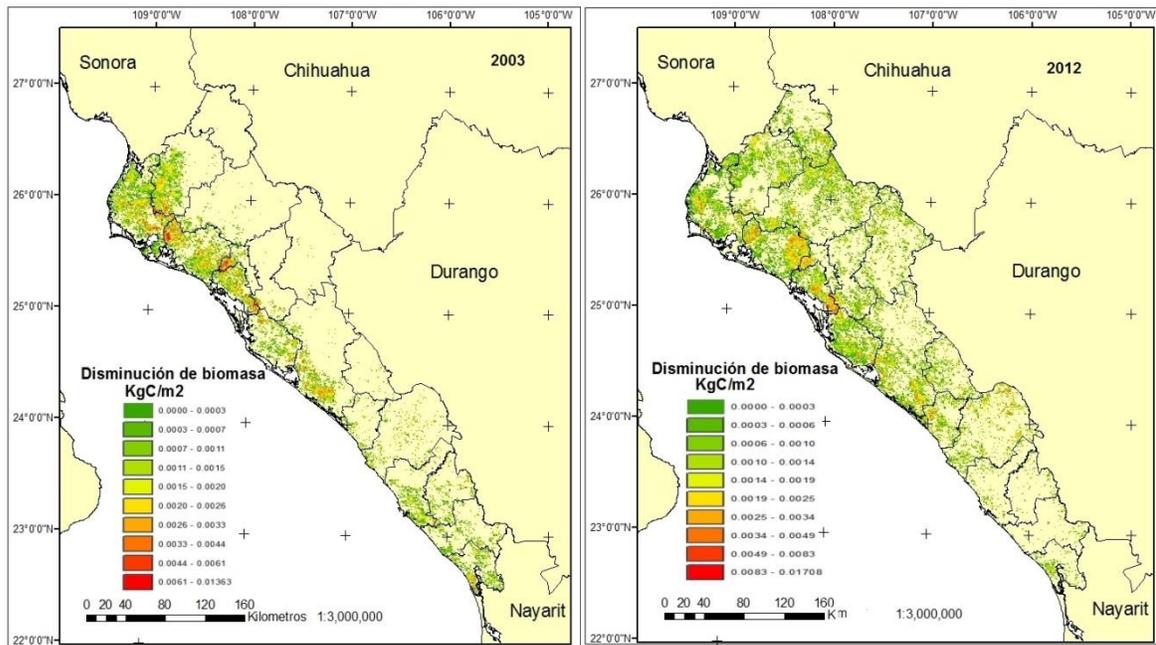


Figura 15. Mapas de disminución de biomasa en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

El factor obtenido a partir de la normalización con una función lineal creciente, de acuerdo con sus histogramas, son muy pocos los píxeles que alcanzaron el valores de 255 en ambos años. La distribución de la mayoría de los píxeles se encuentra con valores menores de < 40 (Figura 16).

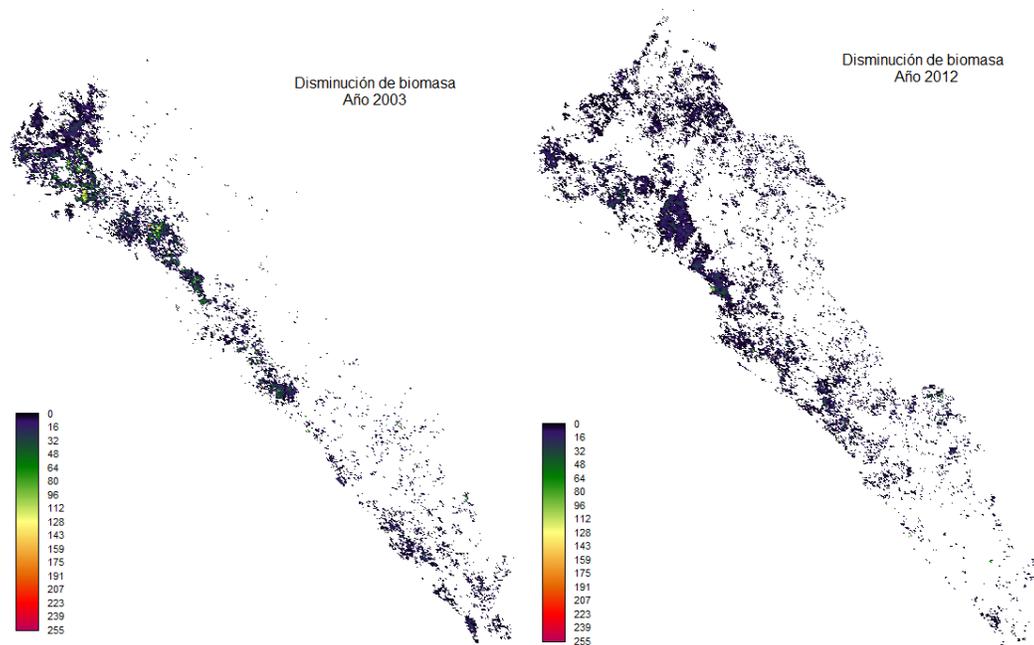


Figura 16. Factores de disminución de biomasa en los años 2003 y 2012.

Temperatura

Los resultados obtenidos del mapa de temperaturas muestran que existe una distribución similar en las zonas de escasa vegetación y zonas agrícolas. Asimismo, se observa que esta va disminuyendo desde las zonas costeras hacia las zonas serranas, siendo éstas las que registran menores temperaturas en el Estado, principalmente, en la frontera con Chihuahua y Durango. La temperatura máxima anual en el año 2003 fue de 37°C, los municipios cercanos a estos valores son Sinaloa de Leyva, Salvador Alvarado y Mocorito. Asimismo, fue para el caso del año 2012, con la diferencia de la temperatura máxima anual fue de 40°C (Figura 17).

Una vez generadas las variables de temperatura se obtuvieron los factores para ambos años, aplicando una normalización de tipo sigmoïdal creciente (Figura 18).

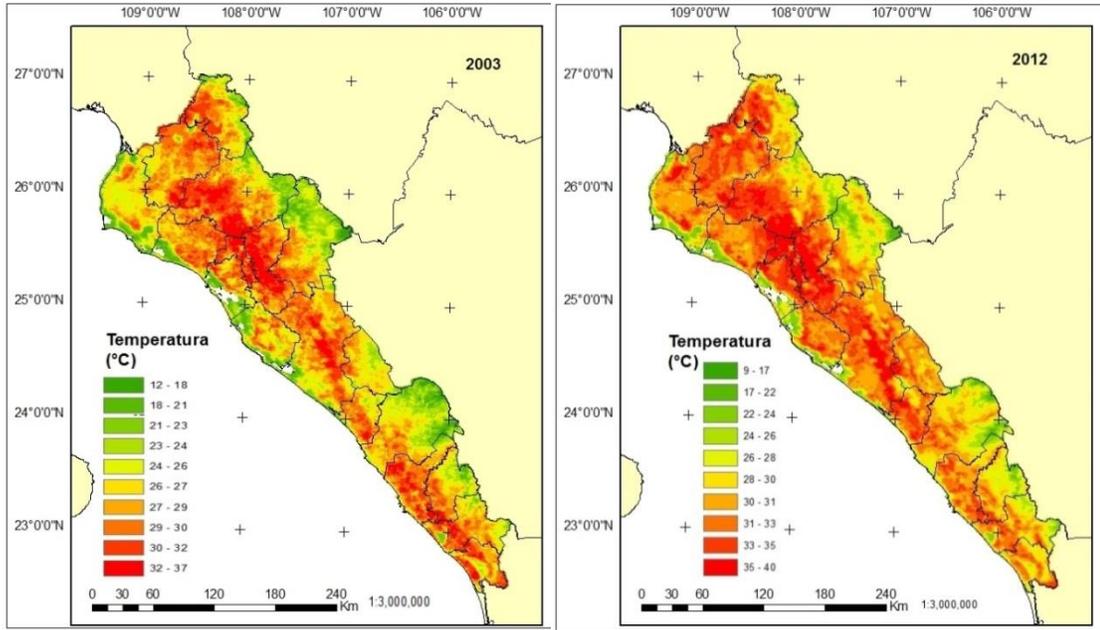


Figura 17. Mapas de temperaturas en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

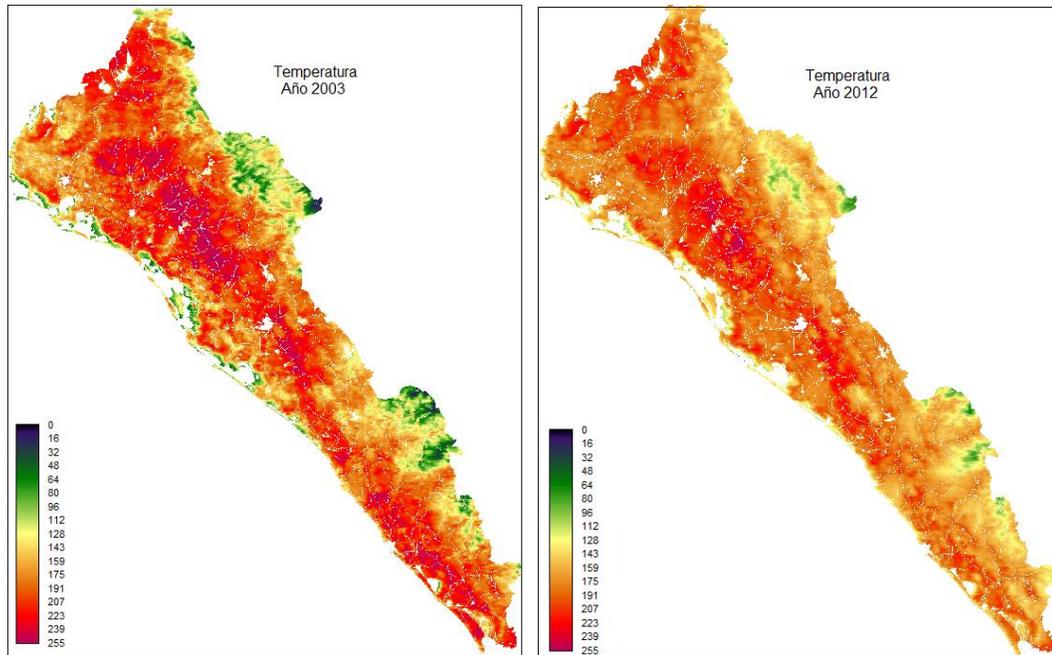


Figura 18. Factores de temperaturas en los años 2003 y 2012.

4.1.3. Criterio antropogénico

Cercanía a carreteras, asentamientos humanos y zonas agrícolas

Las carreteras son factores determinantes en el desarrollo económico y social para cualquier poblado, tienen una distribución más ramificada en la zona norte y centro de Sinaloa debido a su actividad agrícola (Figura 19).

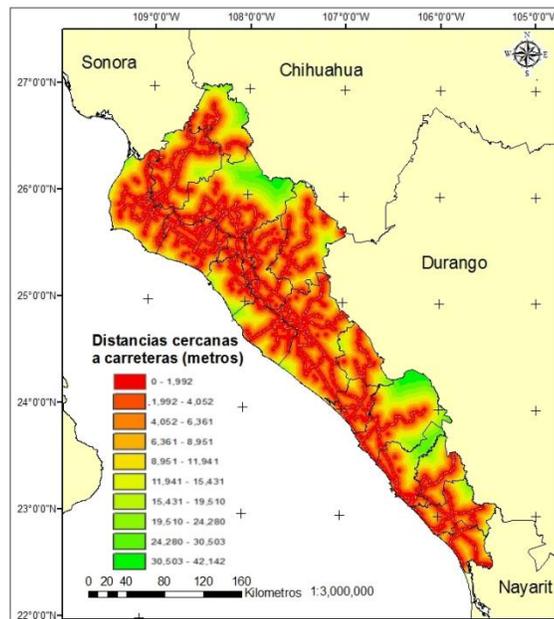


Figura 19. Mapa de distancias cercanas a carreteras en el Estado de Sinaloa.

Asimismo, la principal concentración de asentamientos humanos (poblados y ciudades) se presentó en la zona norte, desde la costa al valle, disminuyendo en pequeños poblados en las zonas serranas. Los principales municipios de mayor concentración son Ahome, Guasave, Angostura, Salvador Alvarado, Navolato y Cuiliacán en ambos años (2003 y 2012) (Figura 20).

También, se encuentra una asignación mayor de zonas agrícolas (Figura 21) en la zona centro y norte, por lo que dispone una mayor distribución de redes viales y mayor concentración de ciudades cercanas en estas zonas. En el sur, los poblados, los caminos y las zonas agrícolas se encuentran en menor cantidad y distribuidas cercas de las zonas costeras.

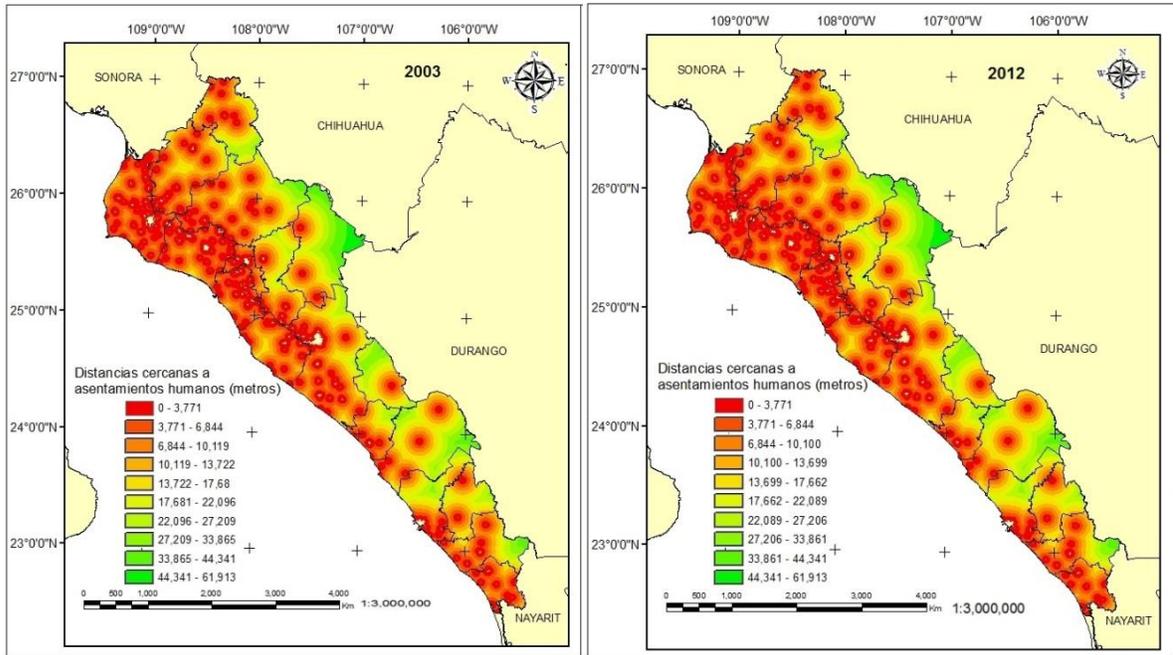


Figura 20. Mapas de distancias cercanas a asentamientos humanos en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

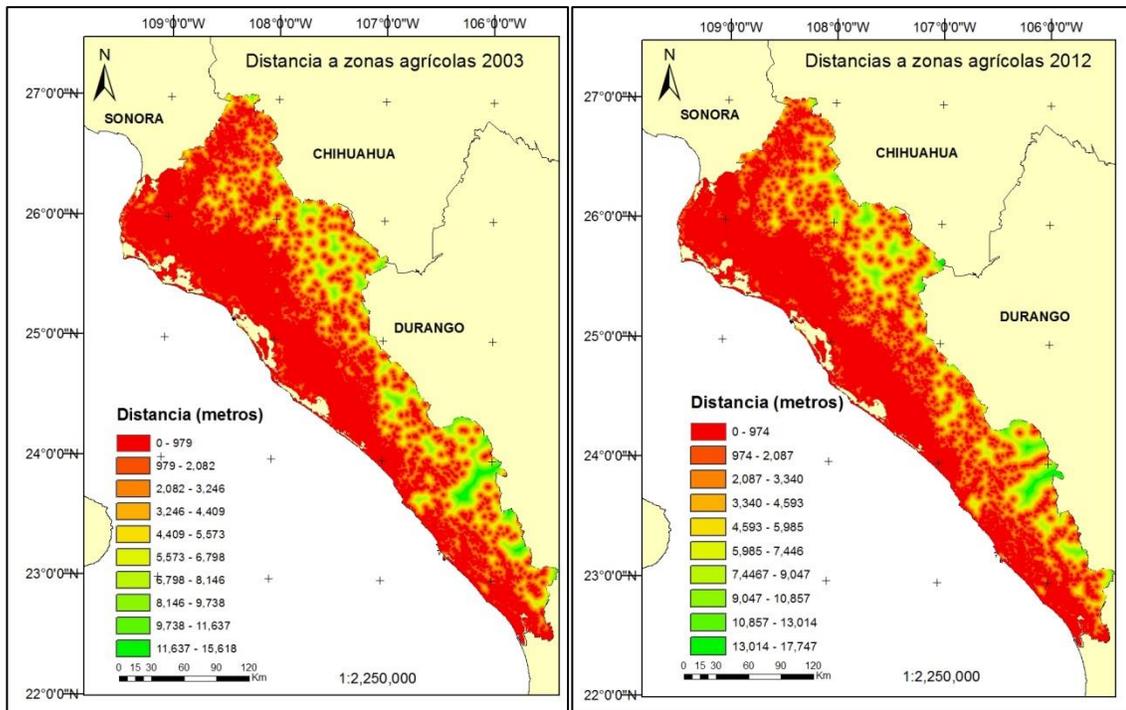


Figura 21. Mapas de distancias cercanas a zonas agrícolas en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

En resumen, en la zona norte y centro se tiene una mayor concentración de variables antropogénicas.

A lo que respecta a los factores, las cercanías a carreteras y asentamientos humanos, se asignó el valor de 255 a los pixeles más cercanos a estos (Figuras 22 y 23). Para el caso de la cercanía a zonas agrícolas el valor de 255 se asignó a las zonas agrícolas (Figura 24).

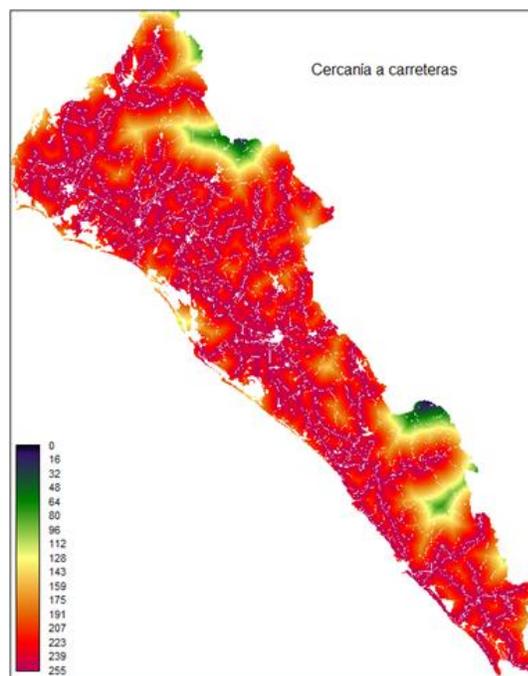


Figura 22. Factor de distancias cercanas a carreteras en el Estado de Sinaloa.

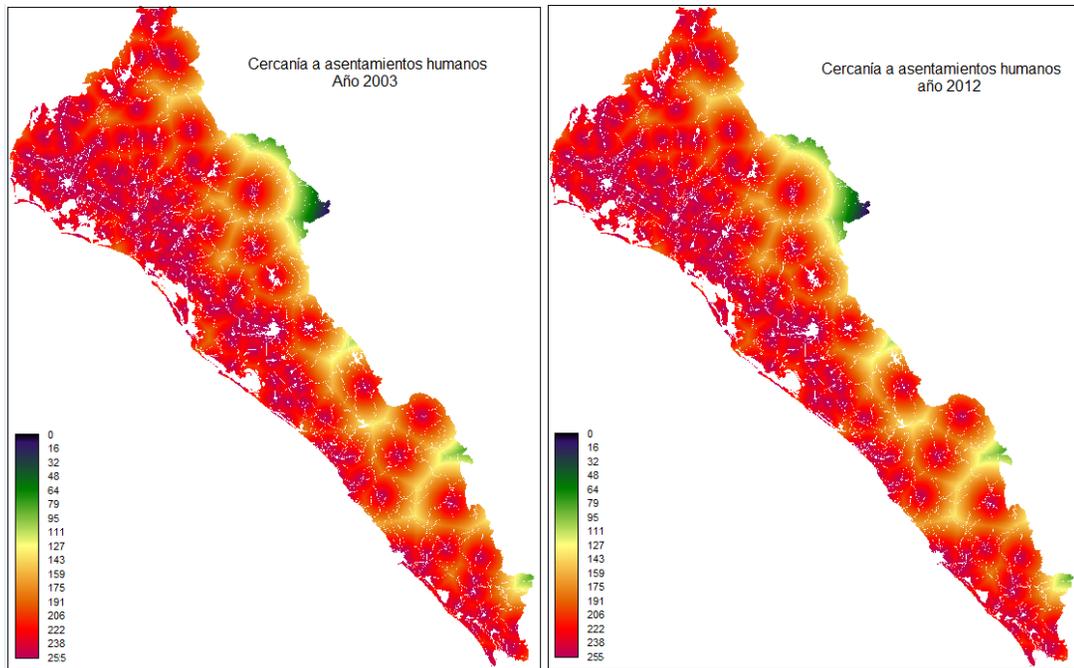


Figura 23. Factores de distancias cercanas a asentamientos humanos en los años 2003 y 2012.

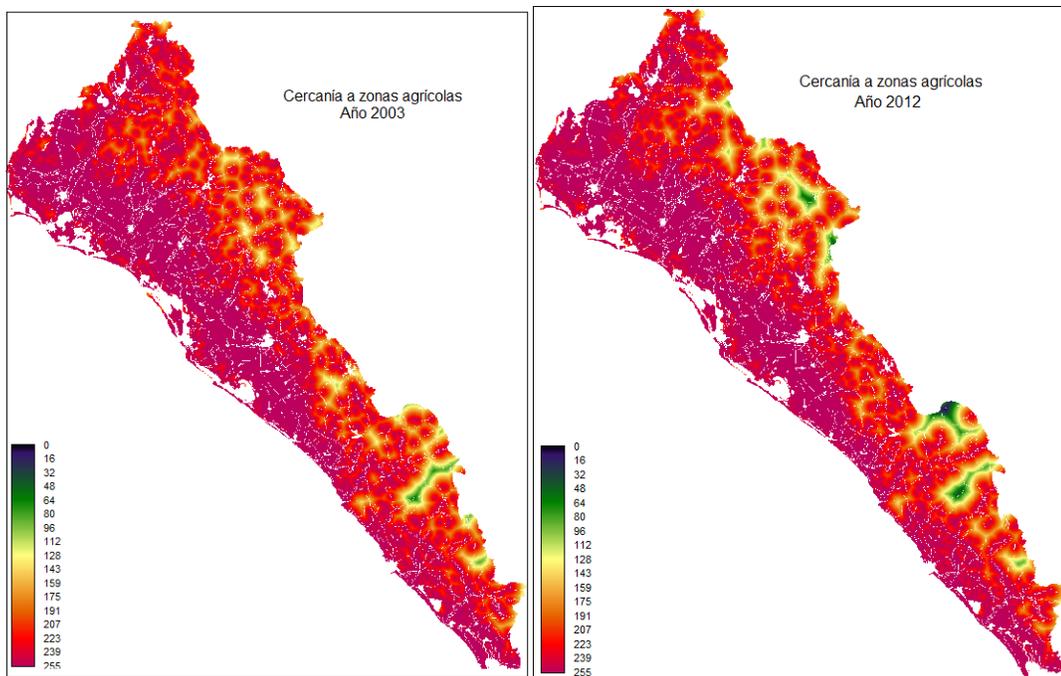


Figura 24. Factores de distancias cercanas a zonas agrícolas en los años 2003 y 2012.

4.1.4. Criterio de humedad de suelo

Contenido de humedad en el suelo (TVDI)

Las zonas con escasez de agua indican zonas donde la radiación del sol es directa sobre el suelo. Por otro lado, zonas con humedad muestran suelos fértiles y con vegetación. El indicador utilizado fue el TVDI. Éste índice utiliza como insumo las variables de temperatura y cubierta vegetal (EVI). En los resultados se observó lo siguiente (Figura 25):

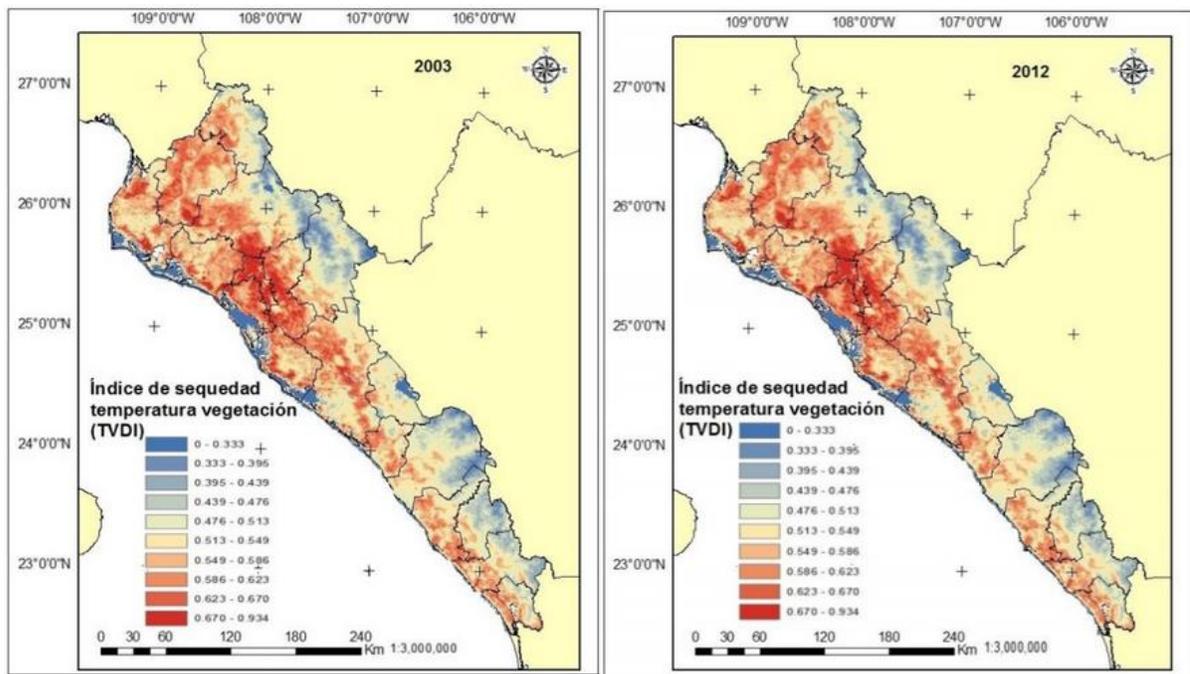


Figura 25. Mapa de contenido de humedad en el suelo en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

- Comportamiento similar en ambos años (2003 y 2012).
- Mayor saturación de humedad en las sierras de Badiraguato, San Ignacio, Rosario y Escuinapa.
- En las zonas centro y norte presenta mayores suelos secos, principalmente, en Salvador Alvarado, Mocorito, Sinaloa de Leyva, Guasave, Ahome, El Fuerte y Choix, creando un corredor de suelos secos, en lo que se puede considerar las

zonas agrícolas. En la zona sur, este corredor se distribuye hacia las zonas costeras pero en menor intensidad.

La relación existente entre el área de suelos secos en zonas agrícolas se puede deber a los sistemas de establecimiento de cultivos hortícolas, los cuales cumplen un ciclo fenológico menor a un año. Al ser los insumos variables anuales, el EVI presenta un valor promedio del ciclo agrícola que va desde la preparación del suelo dependiendo del tipo de labranza, la producción del cultivo, y el descanso del suelo que en ocasiones puede tener vegetación o no, por lo que el valor depende básicamente del tipo de cultivo.

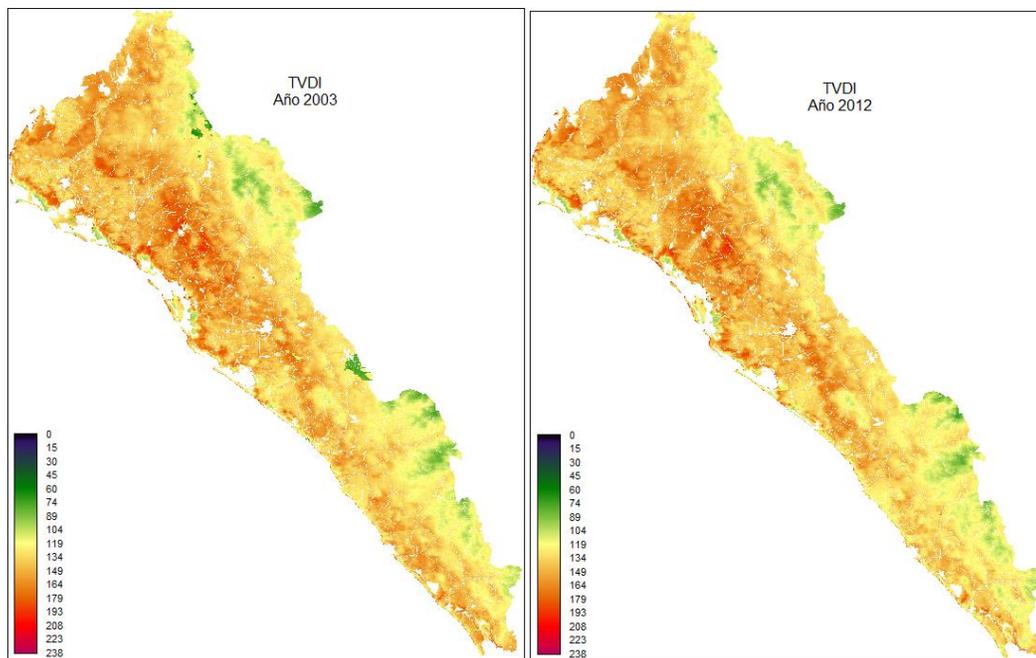


Figura 26. Factores de contenido de humedad en el suelo (TVDI) en los años 2003 y 2012.

Al conocer el rango de valores que toma el índice (0 totalmente seco y 1 saturado de agua), el valor máximo del factor fue de 238 en ambos años (Figura 26).

Precipitación

Dentro del ciclo hidrológico se encuentran las precipitaciones. La cantidad varía en el tiempo y el espacio, siendo responsable de distribuir el agua a distintas par-

tes del planeta. La escasez de precipitación fomenta las sequías afectando los ecosistemas, siendo otro catalizador en el proceso de desertificación.

En el año 2003, los municipios que registraron precipitaciones menores a la media (674.44 mm anual), son Ahome, El Fuerte, Guasave, Salvador Alvarado, Sinaloa de Leyva, Angostura, Navolato, Badiraguato, Elota y San Ignacio. En 2012, gran parte del territorio está bajo la media anual con excepción de pequeñas áreas de estaciones que registraron precipitaciones mayores como son en las zonas costeras de Ahome y Mazatlán (Figura 27).

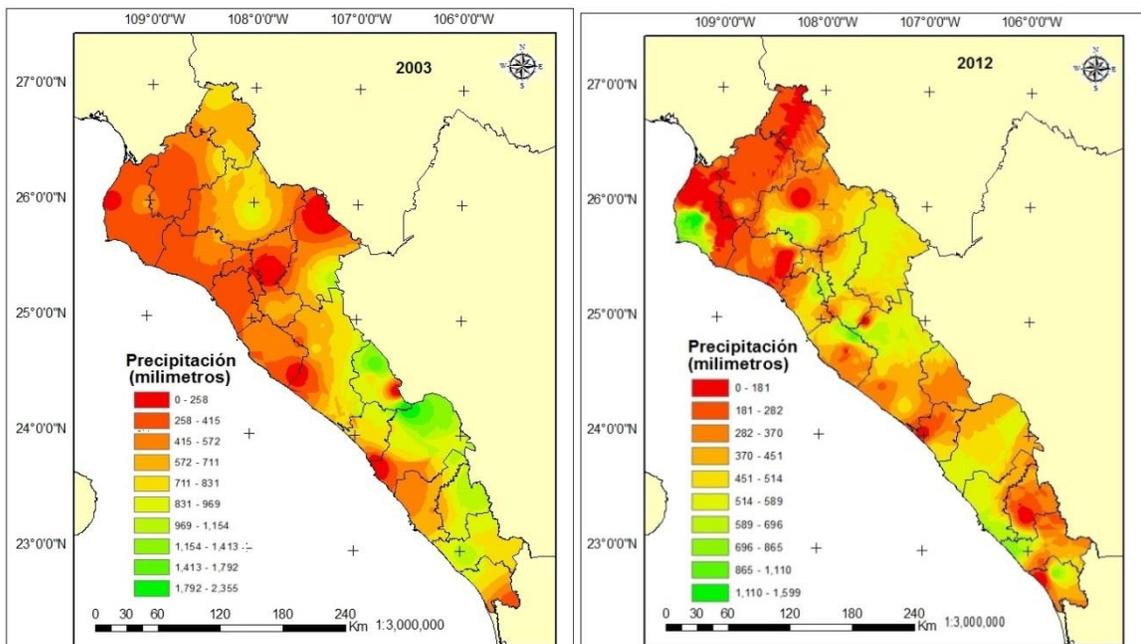


Figura 27. Mapas de precipitación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

No hubo una diferencia entre la variable y los factores, tuvieron el mismo comportamiento (Figura 28), a mayor valor en el factor menor precipitación en la variable, representando las zonas más secas.

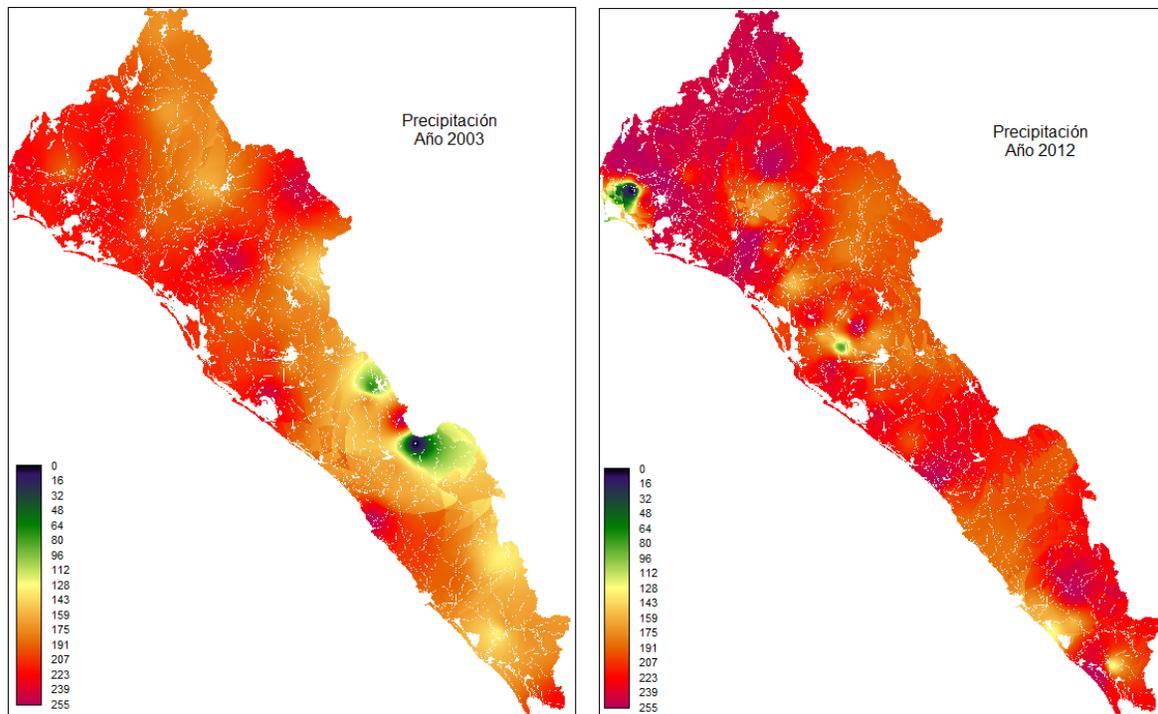


Figura 28. Factores de precipitación en los años 2003 y 2012.

Lejanía a redes hidrológicas

Las redes hidrológicas distribuyen el agua superficial que es imprescindible para la vida, satisfaciendo las necesidades humanas, además para usos más específicos en el desarrollo urbano y la agricultura. En la zona norte de Sinaloa, se encuentran áreas alejadas de las fuentes de redes hidrológicas, al igual que en algunos municipios de la zona centro (Angostura, Mocorito y Salvador Alvarado). En la zona sur, se observa que existe una mayor distribución de redes hídricas. En la normalización, los píxeles más alejados a las redes se le asignó los valores más altos (255) (Figura 29).

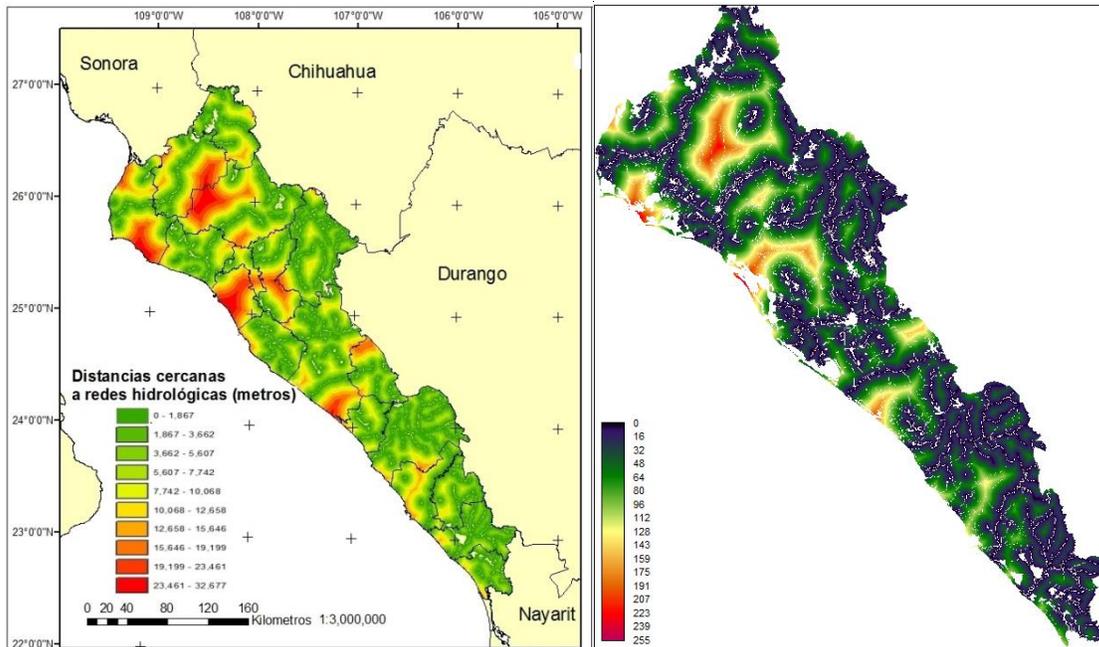


Figura 29. Mapa de distancias cercanas a redes hidrológicas en el Estado de Sinaloa y su factor.

4.1.5. Criterio de suelos

Zonas cercanas a degradación de suelos

Los suelos que presentaron degradación física se encuentran en pequeñas áreas ubicadas en los municipios de Ahome, Guasave, Mocorito, Culiacán y Mazatlán. Lo que se considera zonas serranas no presentó este tipo de degradación (Figura 30). Por otro lado, la degradación química en los suelos se mostró en la mayor parte territorio, principalmente, en las zonas agrícolas, y cerca de las costas (Figura 31).

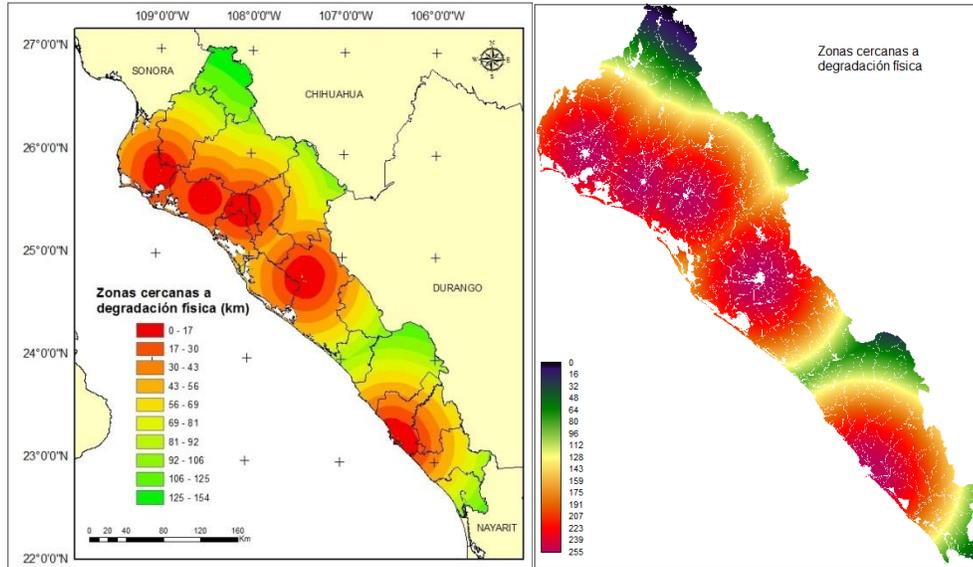


Figura 30. Mapa de zonas cercanas a degradación física en el Estado de Sinaloa y su factor.

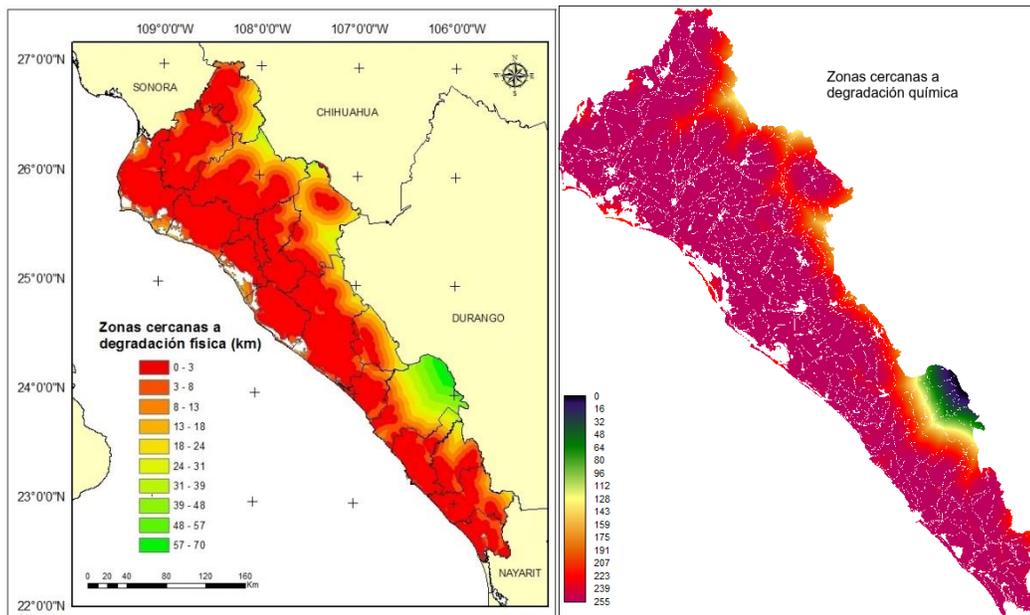


Figura 31. Mapa de zonas cercanas a degradación química en el Estado de Sinaloa y su factor.

Zonas cercanas a erosión de suelos

La erosión eólica se presentó en la zona norte cerca de los límites de Sinaloa y Sonora (Ahome y El Fuerte) (Figura 32). La erosión hídrica se presentó en determinadas áreas, dentro de los municipios de Choix, El Fuerte, Sinaloa de Leyva, Badiraguato, Mocorito, Culiacán, Cósala, Elota, San Ignacio y Concordia, enfocándose, principalmente en las zonas serranas (Figura 33).

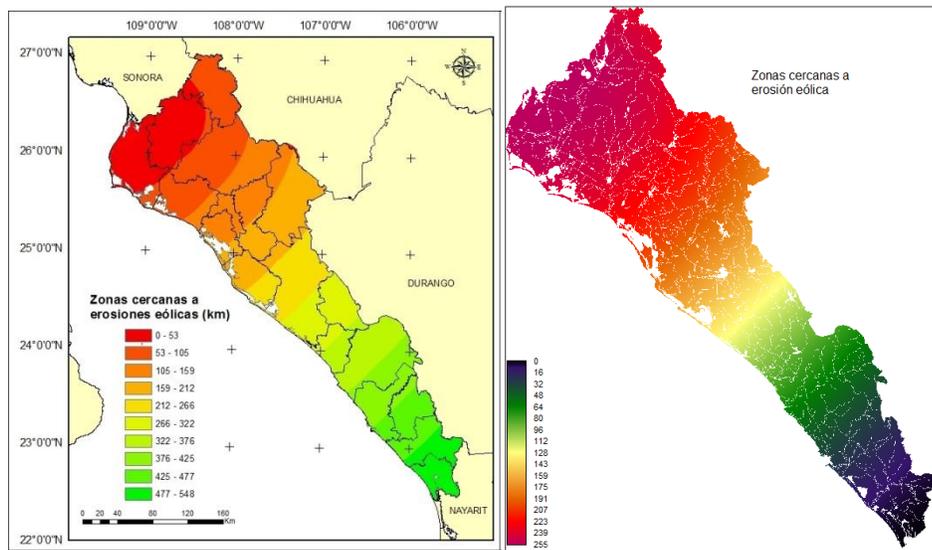


Figura 32. Mapa de zonas cercanas a erosión eólica en el Estado de Sinaloa y su factor.

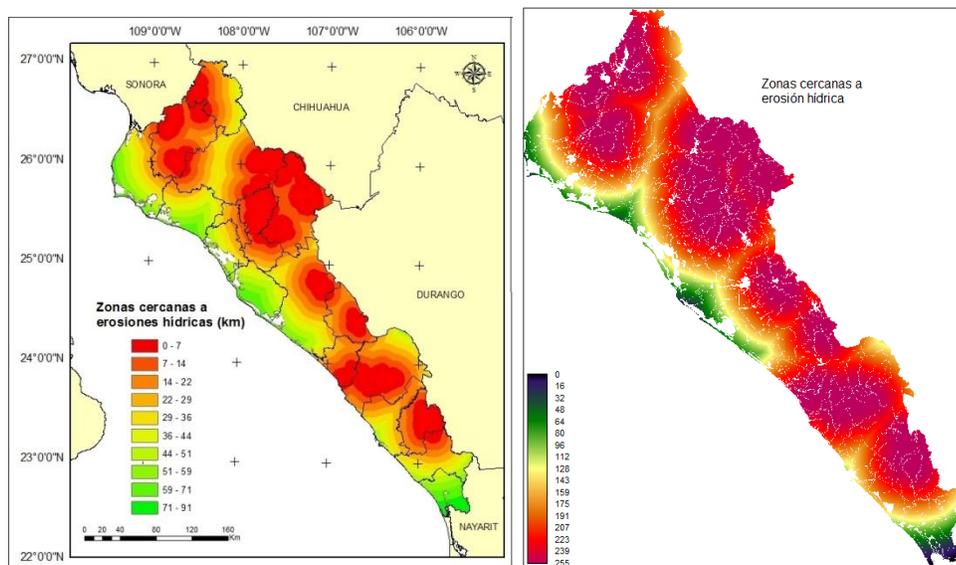


Figura 33. Mapa de zonas cercanas a erosión hídrica en el Estado de Sinaloa y su factor.

4.1.6. Criterio de vegetación

Cubierta vegetal y suelos con escasa vegetación

Las zonas sin cubierta o con escasa vegetación, son un indicador de un problema ambiental existente en forma directa y/o indirecta. Estas zonas son propicias a erosiones debido a no existir protección alguna al suelo que puede propiciar a la existencia a un aumento de temperatura y albedo. Estas características atribuyen a suelos desertificados.

La cubierta vegetal en los años 2003 y 2012 la distribución es muy similar (Figura 34) Las zonas con cubiertas vegetales más densas ocurren en la zona norte hacia la zona centro en los municipios de Choix, Sinaloa de Leyva, Badiraguato y Culiacán, principalmente, en las zonas serranas. Hacia el sur los municipios de Cósala, San Ignacio, Mazatlán, Rosario y Escuinapa disponen de una mayor extensión de zonas con densas cubiertas vegetales, llegando en algunos casos hasta las costas.

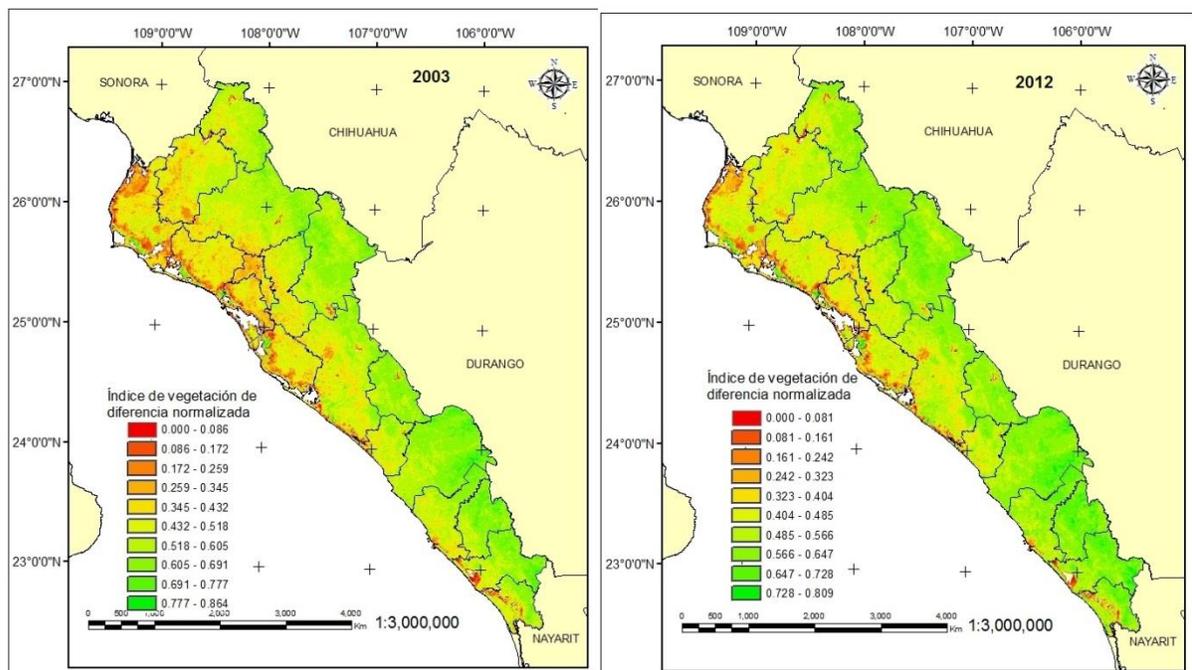


Figura 34. Mapas de cubierta vegetal en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

Por otro lado, los municipios costeros en la zona norte y centro del Estado presentan una reducción de cubierta vegetal, principalmente, en el corredor agrícola. Para zonas consideradas como escasa vegetación en ambos años se presenta un corredor que viene desde Choix y el Fuerte, pasando por Sinaloa de Leyva, Mocorito, Badiraguato, Culiacán, Elota, Mazatlán, Concordia y Rosario (Figura 35).

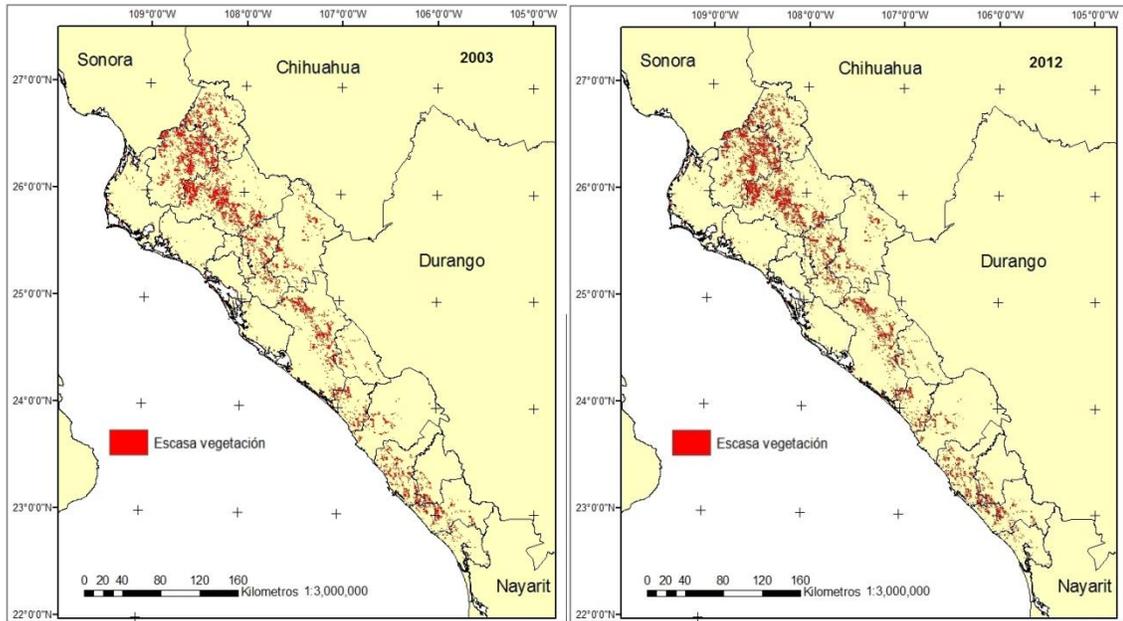


Figura 35. Mapas de escasa vegetación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

En lo que respecta a los factores, la normalización se estableció dentro del rango de suelos desnudos y el valor del índice para vegetación densa, por lo que en consecuencia gran parte de la sierra disponen de valores de 0 (Figura 36). Para el caso de escasa vegetación el factor es dicotómico (Figura 37).

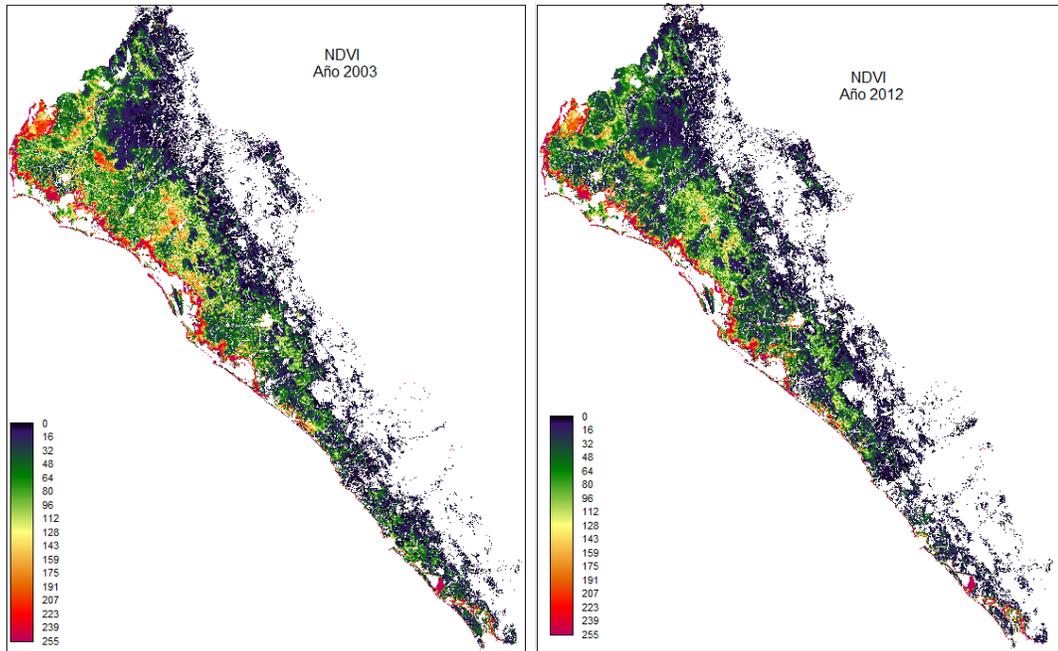


Figura 36. Factores de cubierta vegetal en los años 2003 y 2012.

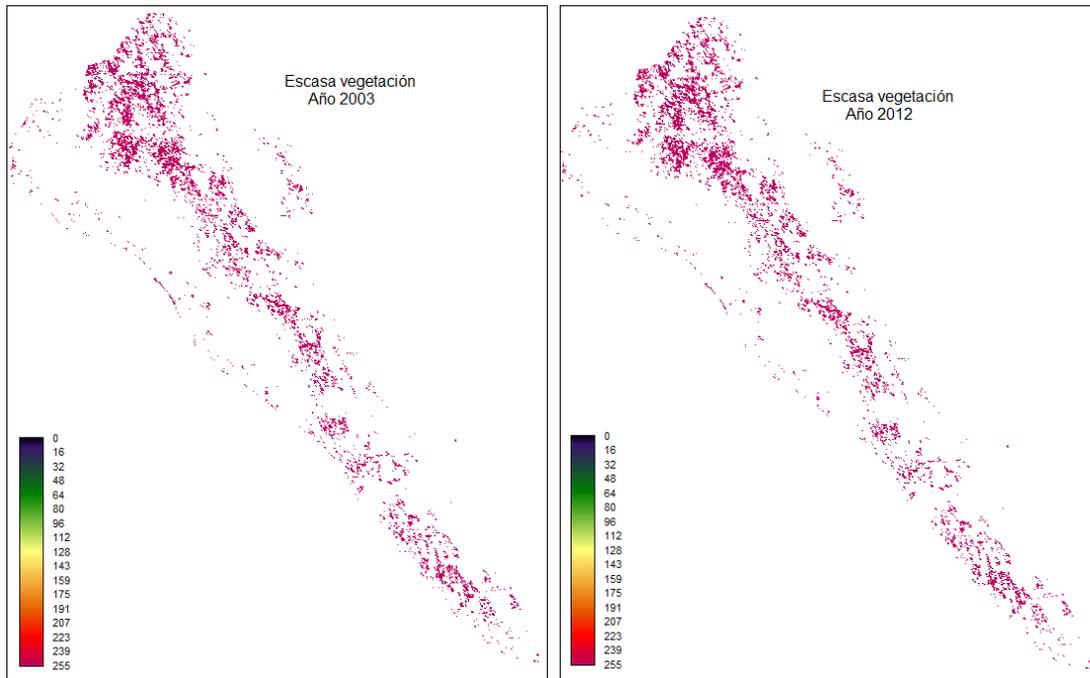


Figura 37. . Factores de escasa vegetación en los años 2003 y 2012.

Deforestación

La deforestación se presenta en casi todo el Estado en ambos años (2003 y 2012), con excepción de las zonas agrícolas. La variable de deforestación está en base a los años que se utilizan para generarla. Por lo que depende mucho de los años seleccionados. En las zonas norte y centro se distribuye la deforestación, principalmente, en zonas serranas. Por otro lado, en la zona sur se presenta desde las costas hacia la sierra (Figura 38). Los factores de deforestación son dicotómicos (Figura 39).

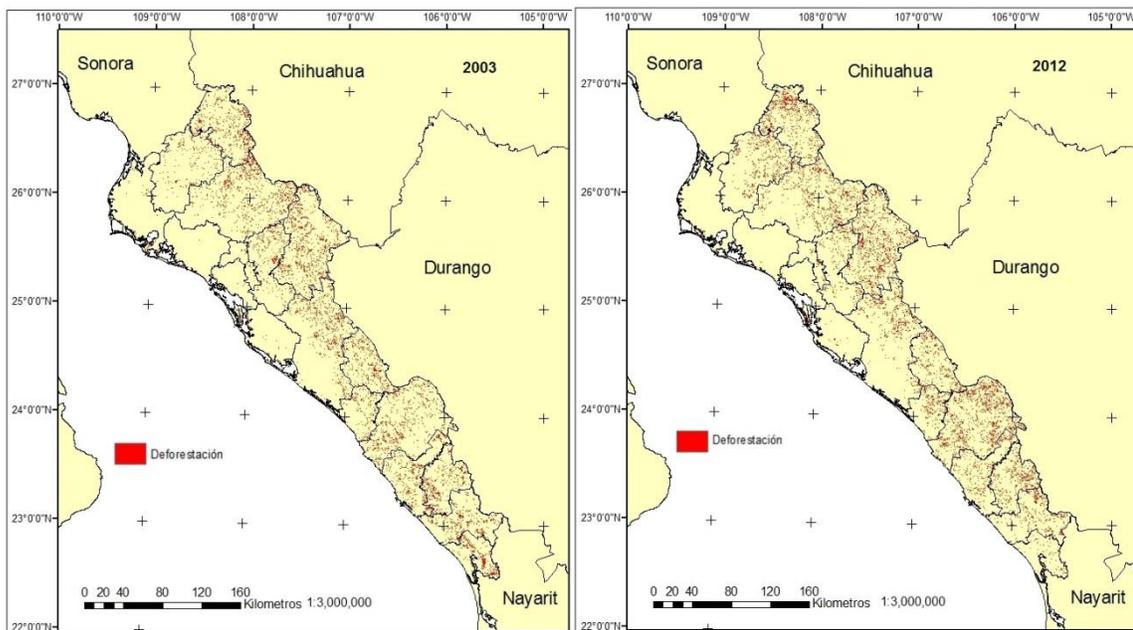


Figura 38. Mapas de deforestación en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

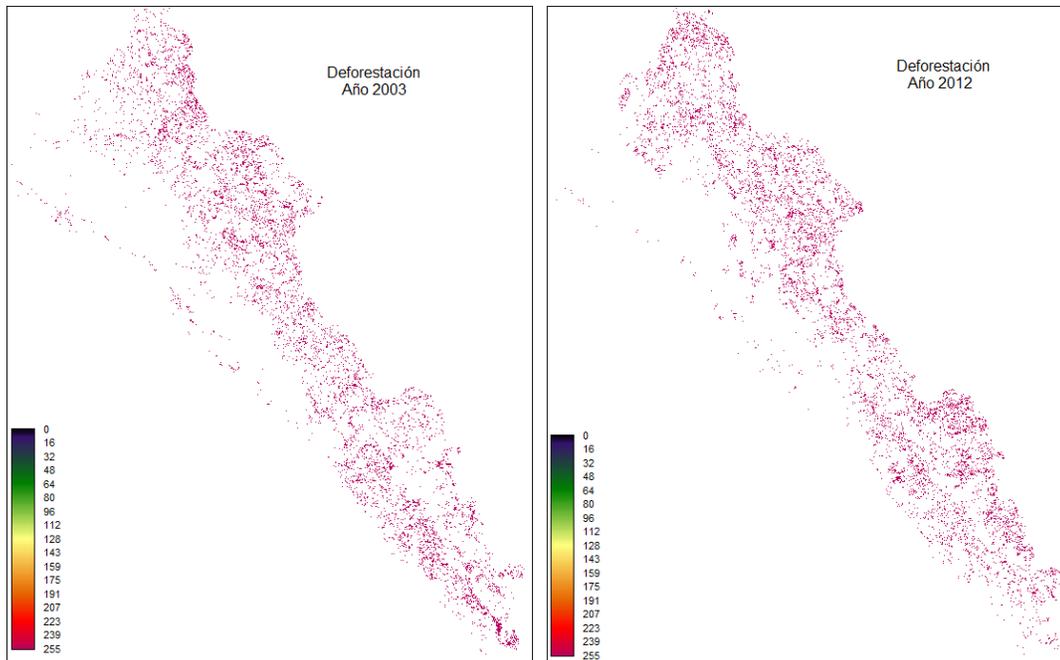


Figura 39. Factores de deforestación en los años 2003 y 2012.

4.2. Correlación de factores

Se realizó una correlación de los factores para determinar el grado de relación entre éstos con el módulo PCA (*Principal Components Analysis*) en el *software* IDRISI. La matriz generada muestra los coeficientes de relación de Pearson momento-producto. Posteriormente, al conocer el grado de relación entre los factores se integra a un método que permita identificar zonas propensas a desertificación.

En ambos años (2003 y 2012), los factores que representaron una correlación alta (> 70) son temperatura y TVDI, esto es debido a que la temperatura es un insumo utilizado para generar el TVDI.

4.2.1. Correlación del año 2003

La matriz de correlación en el año 2003 (Tabla 18), en el criterio ambiental, el factor de temperatura tiene una correlación de 0.74 con el factor TVDI, también con

los factores de cercanía a carreteras y zonas agrícolas en menor grado con 0.45 y 0.44 respectivamente.

En el criterio antropogénico, el factor de cercanía a asentamientos humanos tiene correlaciones de 0.53, 0.42 y 0.41 con los factores cercanía a zonas agrícolas, TVDI y zonas cercanas a degradación química. El factor cercanía a carreteras tiene una correlación entre 0.40 y 0.45 con los factores cercanía a zonas agrícolas, TVDI y zonas cercanas a degradación química. Asimismo, el factor cercanía a zonas agrícolas muestra una correlación de 0.53 con TVDI, 0.48 con zonas cercanas a degradación química y 0.40 con NVDI.

El criterio de humedad, el factor TVDI tiene una correlación con los factores zonas cercanas a degradación química e NVDI con 0.47 y 0.55 respectivamente.

4.2.2. Correlación del año 2012

La matriz de correlación en el año 2012 (Tabla 19), en el criterio ambiental, el aumento de albedo tiene una correlación de 0.41 con el NVDI. El factor temperatura tiene una correlación de 0.88 con TVDI, con los factores cercanía a asentamientos humanos, a carreteras, a zonas agrícolas y zonas cercanas a degradación química tienen valores entre 0.40 y 0.46.

El criterio antropogénico, el factor cercanía a zonas agrícolas tiene una correlación de 0.50 con el factor de cercanía a asentamientos humanos. El factor cercanía a carreteras tiene una correlación de 0.51 con los factores cercanía a zonas agrícolas y zonas cercanas a degradación química, asimismo con los factores TVDI y zonas cercanas a degradación físicas tienen valores 0.41 y 0.44 respectivamente. El factor cercanía a zonas agrícolas con los factores TVDI y zonas cercanas a degradación química con valores 0.50 y 0.52 respectivamente, y con zonas cercanas a degradación física con valor de 0.40.

En el criterio de humedad, el TVDI tiene una correlación con un valor de 0.52. Por último, en el criterio de suelos, el factor de zonas cercanas a degradación física con el factor de zonas cercanas a degradación química tiene un valor de correlación de 0.45.

Tabla 18. Matriz de correlación lineal de Pearson momento-producto entre los factores en el año 2003.

Criterios	Factores	A			B			C			D				E		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A) Ambiental	1) Aumento de albedo	1.00	-0.01	0.00	0.23	0.14	0.26	0.16	0.02	0.11	0.00	0.23	0.03	-0.09	0.33	-0.06	-0.01
	2) Disminución de biomasa	-0.01	1.00	0.01	0.15	0.11	0.14	0.13	0.00	0.13	0.00	0.20	0.01	-0.05	0.18	-0.04	-0.06
	3) Temperatura superficial	0.00	0.01	1.00	0.36	0.45	0.44	0.74	0.18	0.19	0.01	0.38	0.01	-0.06	0.16	-0.03	0.24
B) Antropogénico	4) Cercanía a asentamientos humanos	0.23	0.15	0.36	1.00	0.32	0.53	0.42	0.15	0.27	0.02	0.41	0.04	-0.23	0.38	-0.10	0.04
	5) Cercanía a carreteras	0.14	0.11	0.45	0.32	1.00	0.43	0.45	0.02	0.35	0.01	0.40	-0.01	-0.07	0.23	-0.05	0.08
	6) Cercanía a zonas agrícolas	0.26	0.14	0.44	0.53	0.43	1.00	0.53	0.14	0.35	0.01	0.48	0.02	-0.08	0.40	-0.05	0.10
C) Humedad	7) Contenido de humedad en el suelo (TVDI)	0.16	0.13	0.74	0.42	0.45	0.53	1.00	0.20	0.33	0.02	0.47	0.07	-0.05	0.55	-0.09	0.21
	8) Lejanía a redes hidrológicas	0.02	0.00	0.18	0.15	0.02	0.14	0.20	1.00	0.22	0.00	0.03	0.05	-0.07	0.21	-0.05	0.10
	9) Precipitación	0.11	0.13	0.19	0.27	0.35	0.35	0.33	0.22	1.00	0.00	0.26	0.06	0.12	0.39	-0.07	0.05
D) Suelo	10) Zonas cercanas a degradación física	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	1.00	-0.01	0.00	-0.01	0.03	0.00	0.00
	11) Zonas cercanas a degradación química	0.23	0.20	0.38	0.41	0.40	0.48	0.47	0.03	0.26	-0.01	1.00	-0.05	-0.23	0.33	-0.10	0.06
	12) Zonas cercanas a erosión eólica	0.03	0.01	0.01	0.04	-0.01	0.02	0.07	0.05	0.06	0.00	-0.05	1.00	-0.02	0.16	-0.02	-0.01
	13) Zonas cercanas a erosión hídrica	-0.09	-0.05	-0.06	-0.23	-0.07	-0.08	-0.05	-0.07	0.12	-0.01	-0.23	-0.02	1.00	-0.10	0.05	0.04
F) Vegetación	14) Índice de vegetación	0.33	0.18	0.16	0.38	0.23	0.40	0.55	0.21	0.39	0.03	0.33	0.16	-0.10	1.00	-0.13	0.04
	15) Deforestación	-0.06	-0.04	-0.03	-0.10	-0.05	-0.05	-0.09	-0.05	-0.07	0.00	-0.10	-0.02	0.05	-0.13	1.00	0.03
	16) Suelos sin o con escasa vegetación	-0.01	-0.06	0.24	0.04	0.08	0.10	0.21	0.10	0.05	0.00	0.06	-0.01	0.04	0.04	0.03	1.00

Tabla 19. Matriz de correlación lineal de Pearson producto-momento entre los factores en el año 2012.

Criterios	Factores	A			B			C			D				E		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A) Ambiental	1) Aumento de albedo	1.00	0.09	-0.09	0.17	0.04	0.17	0.05	0.04	0.03	0.13	0.08	0.07	-0.35	0.41	-0.05	-0.04
	2) Disminución de biomasa	0.09	1.00	0.04	0.09	0.01	0.04	0.07	0.03	0.05	0.03	-0.02	0.08	-0.09	0.10	-0.02	-0.08
	3) Temperatura superficial	-0.09	0.04	1.00	0.40	0.46	0.53	0.88	0.18	0.06	0.37	0.43	0.24	0.07	0.27	-0.11	0.24
B) Antropogénico	4) Cercanía a asentamientos humanos	0.17	0.09	0.40	1.00	0.32	0.50	0.38	0.15	0.12	0.38	0.37	0.19	-0.31	0.33	-0.12	0.03
	5) Cercanía a carreteras	0.04	0.01	0.46	0.32	1.00	0.51	0.41	0.02	-0.08	0.44	0.51	0.08	-0.06	0.19	-0.11	0.08
	6) Cercanía a zonas agrícolas	0.17	0.04	0.53	0.50	0.51	1.00	0.50	0.15	0.08	0.40	0.52	0.19	-0.28	0.34	-0.13	0.08
C) Humedad	7) Contenido de humedad en el suelo (TVDI)	0.05	0.07	0.88	0.38	0.41	0.50	1.00	0.21	0.09	0.35	0.39	0.32	-0.03	0.52	-0.12	0.22
	8) Lejanía a redes hidrológicas	0.04	0.03	0.18	0.15	0.02	0.15	0.21	1.00	0.05	0.20	0.17	0.28	-0.06	0.21	-0.06	0.09
	9) Precipitación	0.03	0.05	0.06	0.12	-0.08	0.08	0.09	0.05	1.00	-0.22	0.09	0.20	0.02	0.10	0.00	0.04
D) Suelo	10) Zonas cercanas a degradación física	0.13	0.03	0.37	0.38	0.44	0.40	0.35	0.20	-0.22	1.00	0.45	0.11	-0.13	0.28	-0.14	0.00
	11) Zonas cercanas a degradación química	0.08	-0.02	0.43	0.37	0.51	0.52	0.39	0.17	0.09	0.45	1.00	0.23	-0.06	0.22	-0.11	0.11
	12) Zonas cercanas a erosión eólica	0.07	0.08	0.24	0.19	0.08	0.19	0.32	0.28	0.20	0.11	0.23	1.00	0.06	0.26	-0.05	0.09
	13) Zonas cercanas a erosión hídrica	-0.35	-0.09	0.07	-0.31	-0.06	-0.28	-0.03	-0.06	0.02	-0.13	-0.06	0.06	1.00	-0.38	0.11	0.09
F) Vegetación	14) Índice de vegetación	0.41	0.10	0.27	0.33	0.19	0.34	0.52	0.21	0.10	0.28	0.22	0.26	-0.38	1.00	-0.13	0.03
	15) Deforestación	-0.05	-0.02	-0.11	-0.12	-0.11	-0.13	-0.12	-0.06	0.00	-0.14	-0.11	-0.05	0.11	-0.13	1.00	0.00
	16) Suelos sin o con escasa vegetación	-0.04	-0.08	0.24	0.03	0.08	0.08	0.22	0.09	0.04	0.00	0.11	0.09	0.09	0.03	0.00	1.00

4.3. Ponderación

En la ponderación de factores, se establecieron primero los pesos para los criterios, posteriormente se ponderó a cada factor dentro de cada criterio. Finalmente se obtuvo el peso final al multiplicar el peso del criterio con el peso de cada factor (Tabla 20).

Tabla 20. Ponderación de criterios y factores.

Criterios	Peso	Factores	Peso	PESO FINAL
Ambiental	0.0667	Aumento de albedo	0.5407	0.0361
		Disminución de biomasa	0.2966	0.0198
		Temperatura superficial	0.1627	0.0109
Antropogénico	0.2666	Cercanía a asentamientos humanos	0.2857	0.0762
		Cercanía a carreteras	0.1429	0.0381
		Cercanía a zonas agrícolas	0.5714	0.1523
Humedad	0.2003	Lejanía a redes hidrológicas	0.5407	0.1083
		Precipitación	0.2966	0.0594
		Contenido de humedad en el suelo	0.1627	0.0326
Vegetación	0.1330	Deforestación	0.2966	0.0394
		Índice de vegetación	0.5407	0.0719
		Suelos sin o con escasa vegetación	0.1627	0.0216
Suelo	0.3334	Degradación física	0.3333	0.1111
		Degradación química	0.3333	0.1111
		Erosión eólica	0.1667	0.0556
		Erosión hídrica	0.1667	0.0556

El resultado del peso final para los factores muestra que se asignó el mayor peso a cercanías a zonas agrícolas, y el menor a temperatura superficial (Figura 40).

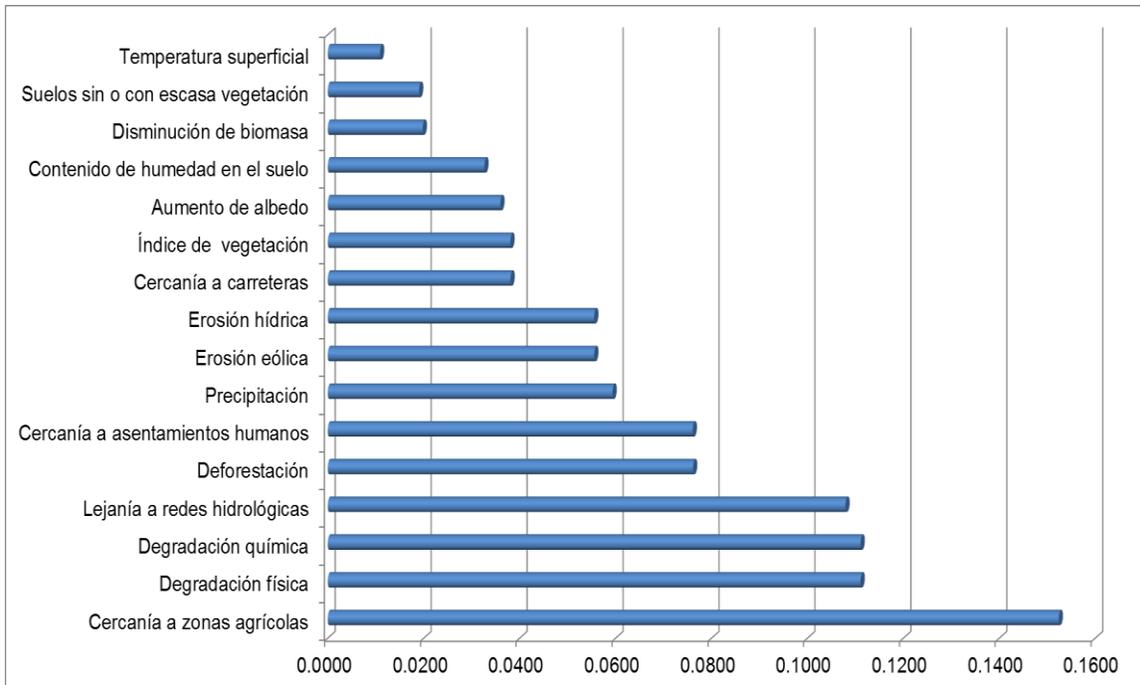


Figura 40 . Pesos finales de los factores.

4.4. Evaluación multicriterio: índice de zonas propensas a desertificación

Dado que esta técnica evalúa a cada factor dentro de los criterios establecidos, a partir de una valoración cuantitativa (valor de peso). Asimismo, la posibilidad de discriminar zonas incoherentes que presenten dicho problema (ejemplo: cuerpos de agua y manchas urbanas). En el resultado de EMC, los valores más elevados representan las zonas con mayor vulnerabilidad a presentar desertificación.

El rango de valores se establece entre 1 y 255, siendo 255 las zonas de mayor vulnerabilidad a desarrollar desertificación bajo los criterios establecidos. Este rango de valores se le denominó como índice de zonas propensas a desertificación (IZPD).

El mapa de IZPD del año 2003 dio como resultado un valor mínimo de 59 y un máximo de 209, con una media de 151.63. Para el caso del año 2012, los valores mínimos y máximos son de 59 y 212, respectivamente, con una media de 152.44.

En la Figura 41, se muestran los histogramas para ambos años. La frecuencia y distribución son muy similares entre sí, la relación entre ambos años tiene un coeficiente de 0.97.

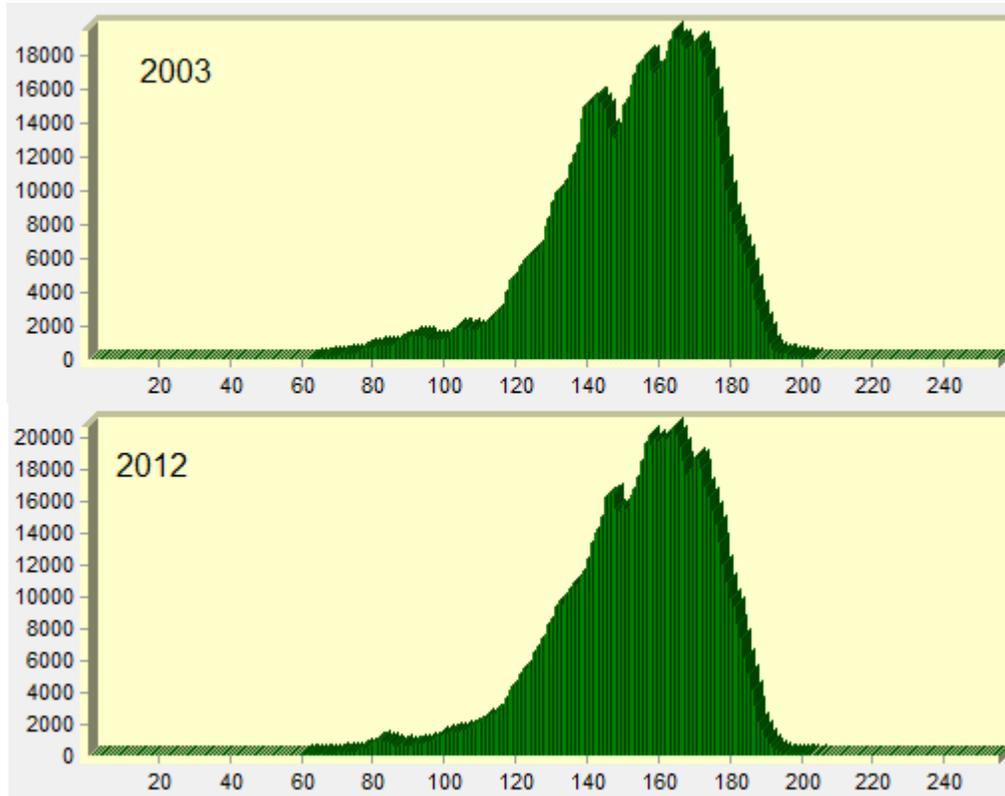


Figura 41. Histogramas de los resultados de la evaluación multicriterio.

El mapa IZPD para ambos años (Figura 42 y 43) muestra un comportamiento similar, teniendo una correlación de 0.97. Para dar veracidad a este índice y determinar la vulnerabilidad en el Estado respecto al fenómeno se realizó una prueba de robustez (validación) para determinar si es viable o no este índice.

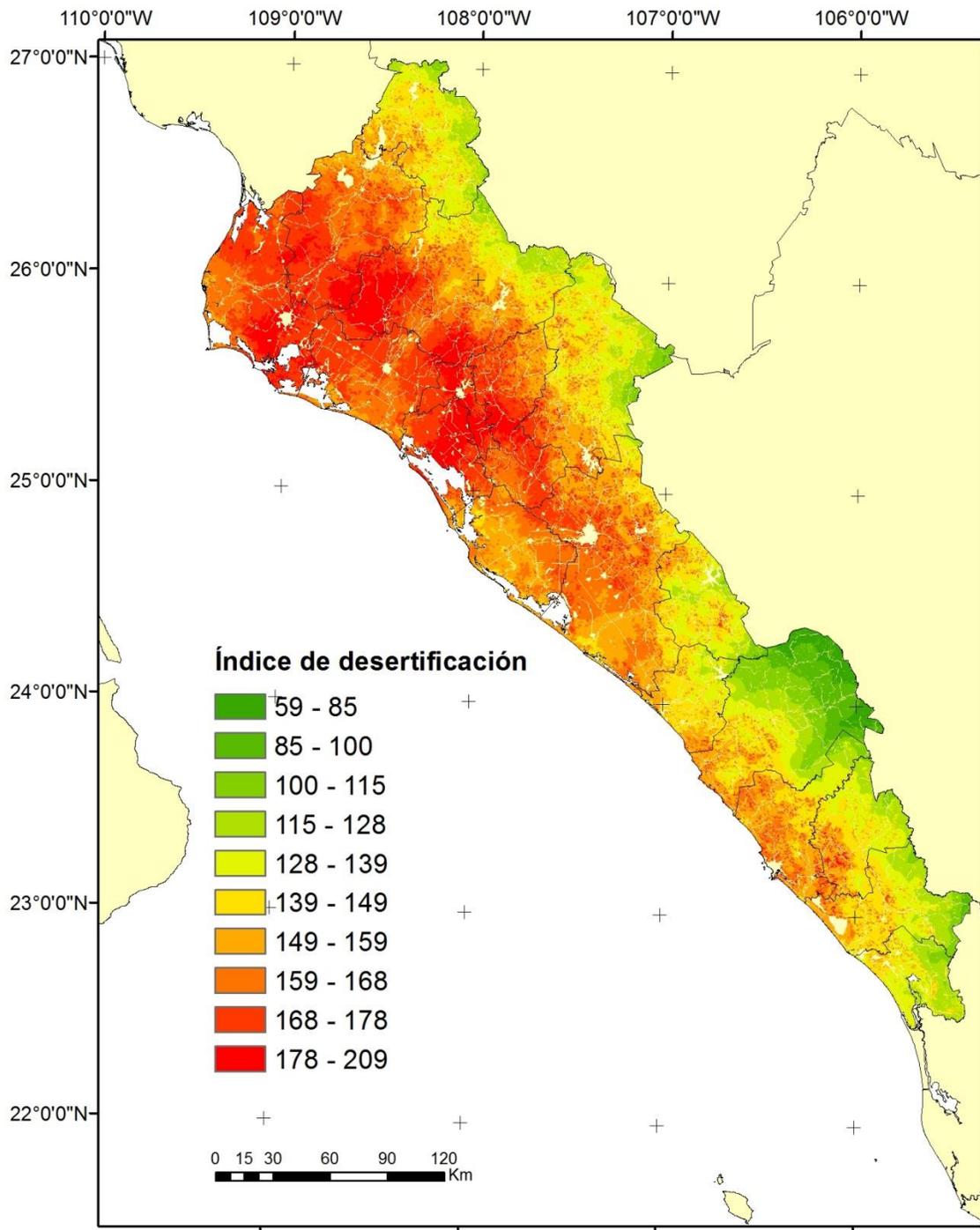


Figura 42. Mapa del índice de zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa en el año 2003.

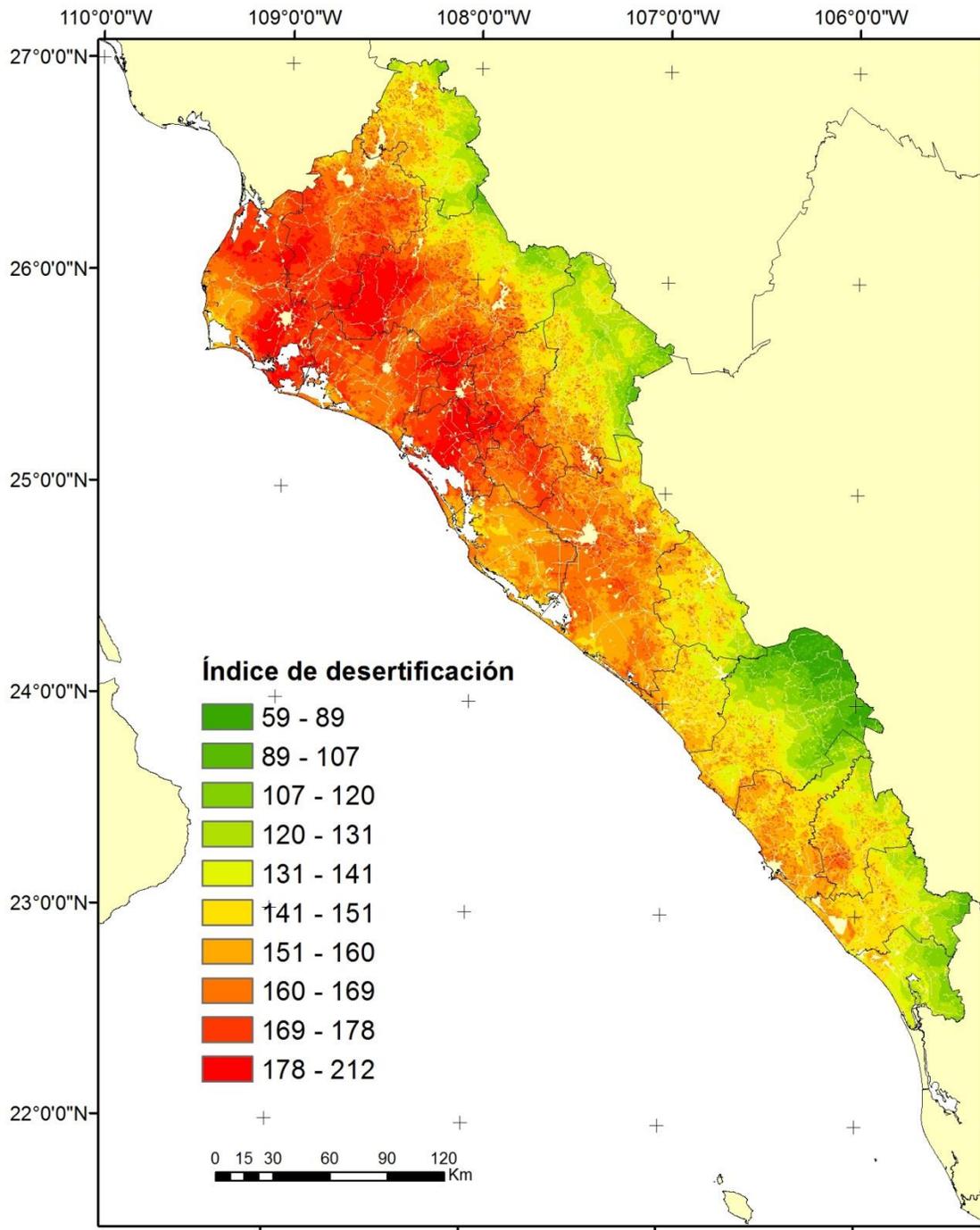


Figura 43. Mapa del índice de zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa en el año 2012.

4.4.1. Validación

4.4.1.1. Validación con mapas de uso de suelo y vegetación e índice de vegetación

La validación se realizó extrayendo los valores medios del IZPD con respecto a las cubiertas de uso de suelo. Los resultados obtenidos muestran que las clases más vulnerables son los matorrales, pastos y cultivos. Esto se entiende debido a que los matorrales y pastos se encuentran en espacios más abiertos y en los climas más secos, además la densidad de vegetación es menor dejando desprotegido el suelo en algunas áreas, lo que permite sea el más vulnerable a desertificación por sus condiciones climáticas y fisiográficas. La categoría de cultivos representa la cubierta antropogénica que sufre mayor impacto de acuerdo con las referencias bibliográficas. Asimismo, el IZPD va disminuyendo de acuerdo con las diferentes cubiertas, que disponen y cumplen con ciertas características ambientales que disminuye el IZPD (Tabla 21).

Tabla 21. Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en las cubiertas de uso de suelo del producto MCD12Q1.

Cubiertas	2003			2012		
	Min	Media	Max	Min	Media	Max
Matorral abierto	123	171.2	205	125	171.2	199
Cultivos	86	166.8	209	92	166.2	207
Pastos	81	164.6	206	100	163.6	197
Matorral cerrado	107	163.6	207	94	159.7	197
Sabanas	73	154.8	206	94	150.2	201
Bosque perenne de coníferas	122	153.3	181	123	154.6	194
Bosque deciduo de coníferas	134	149.5	175	124	154.2	183
Sabanas arboleadas	62	147.2	209	60	150.7	212
Bosque perenne de latifoliadas	68	137.2	187	61	150.8	196
Bosque deciduo de latifoliadas	66	136.8	190	68	142.2	205
Bosques mixtos	59	134.5	191	59	135.4	205

El valor medio más alto es en matorrales abiertos para ambos años (171.20 y 171.27) seguidos de cultivos (166.81 y 166.20) y pastos (164.66 y 163.66).

Asimismo se utilizó el índice de vegetación (NDVI) para correlacionarlo mediante una regresión lineal y el IZPD, obteniéndose coeficientes de -0.63 y -0.56 para los años 2003 y 2012, respectivamente (Figura 44). Lo anterior muestra que el IZPD disminuye mientras aumenta el valor de NDVI, determinándose que a menor densidad de vegetación existe mayor probabilidad de presentar suelos con desertificación.

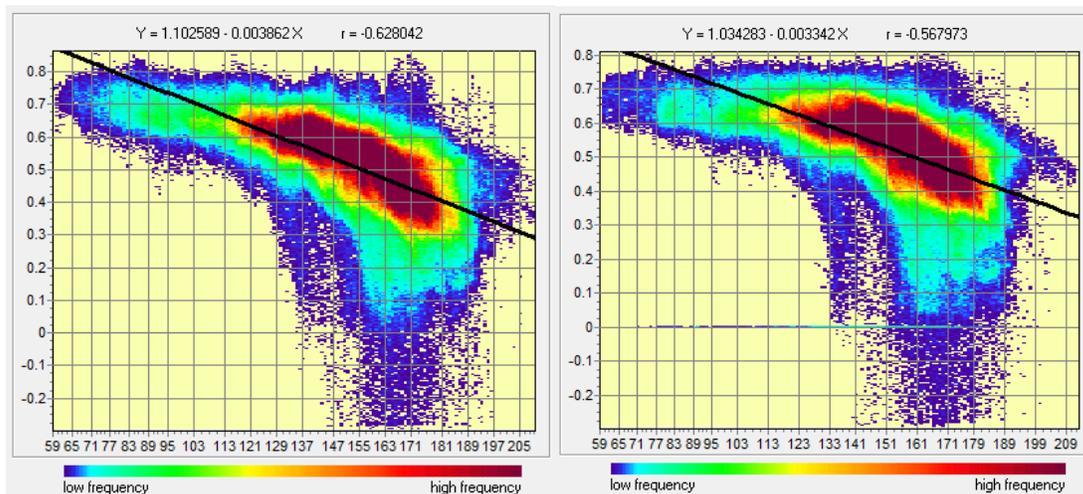


Figura 44. Resultados de la regresión lineal en el *software* IDRISI para el caso de índice de zonas propensas a desertificación y NDVI (Izquierda año 2003, derecha año 2012).

Validación con mapa de climas

El coeficiente de correlación con este tipo de parámetro son de -0.68 y -0.69 para 2003 y 2012 respectivamente. Como se estimó, los valores medios más altos se encuentran en los climas áridos. El clima muy árido cálido tiene un valor de 172.14 y 172.02 para 2003 y 2012, respectivamente (Tabla 22).

Tabla 22. Valores medios del índice de zonas propensa a desertificación en los tipos de climas.

Climas	2003			2012		
	Min	Media	Max	Min	Media	Max
Muy árido cálido	148	172.0	205	149	172.0	204
Árido cálido	139	167.5	209	139	167.5	207
Semiárido cálido	114	161.5	209	113	162.5	212
Semiárido semicálido	145	157.0	182	146	157.3	184
Cálido subhúmedo	66	139.7	200	61	141.2	194
Semicálido subhúmedo	61	127.0	195	59	127.4	195
Templado	59	122.6	175	60	123.1	177

Validación con mapa de aridez

En la Figura 45, se muestran las zonas climáticas de DeMartonne. Para ello se utilizaron los valores del índice bajo la hipótesis de valores menores del índice de DeMartonne, mayores valores del IZPD.

El coeficiente arrojado por la regresión lineal son -0.70 y 0.28 para el año 2003 y 2012. Para el año 2003 muestra una relación alta, sin embargo no es el caso para el año 2012, posiblemente la baja relación se deba a la variación de la precipitación en ese año (Figura 46).

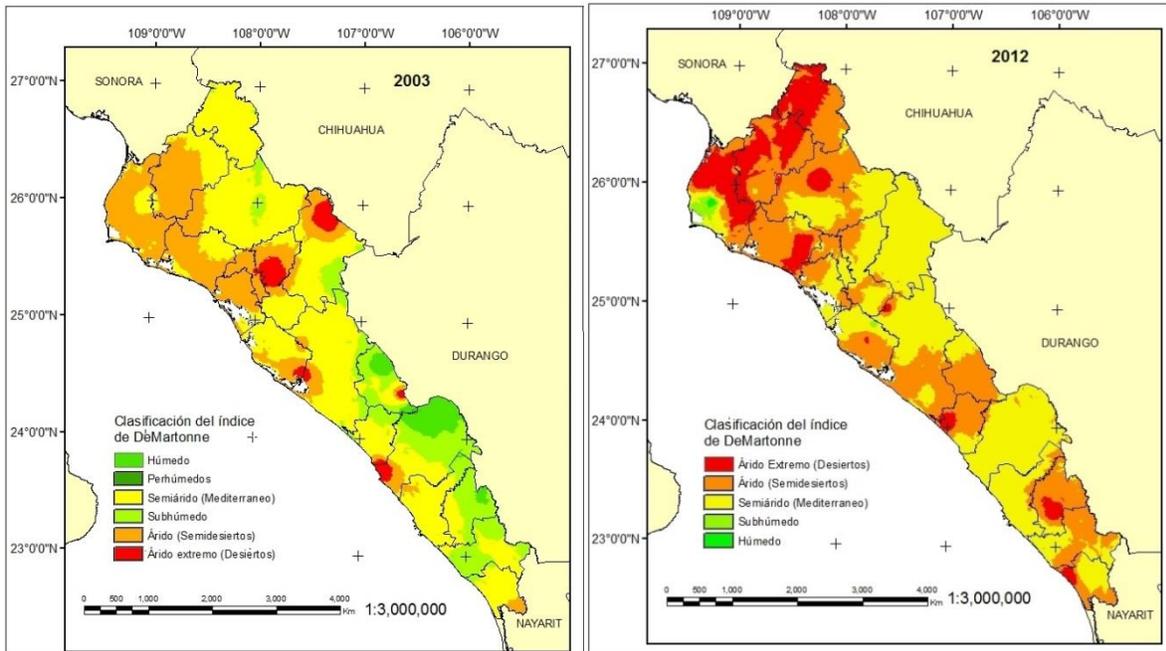


Figura 45. Mapas de zonas climáticas por el índice de DeMartonne en el Estado de Sinaloa en los años 2003 y 2012.

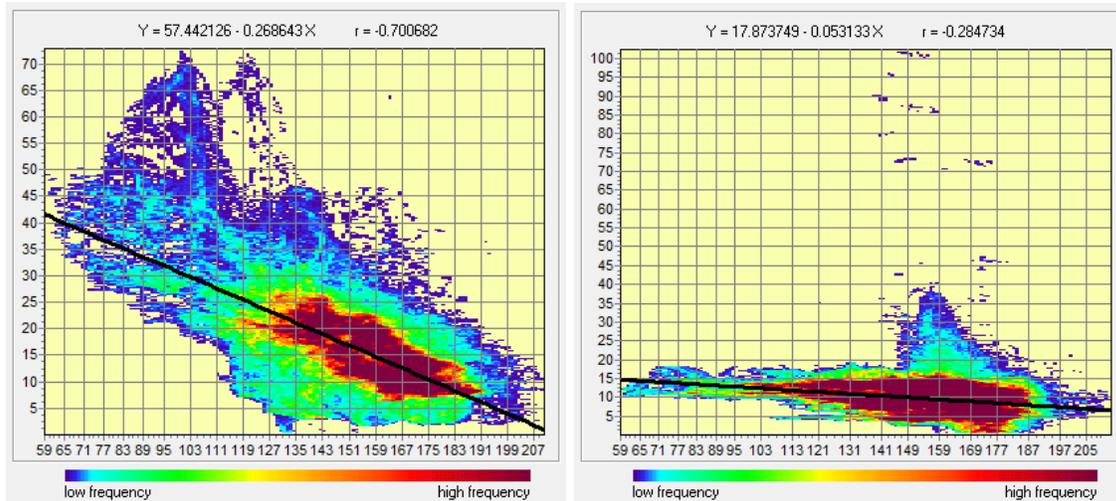


Figura 46. Resultados de la regresión lineal en el software IDRI para el caso de índice de zonas propensas a desertificación y el índice de DeMartonne.

Validación con mapa de intensidad de degradación

El grado de intensidad, presenta también un comportamiento similar de aumento en el nivel de vulnerabilidad con los valores medios del IZPD (Tabla 23). Los valores medios del IZPD mostraron que a medida que aumenta el nivel de vulnerabilidad aumenta la intensidad de degradación en los suelos.

Tabla 23. Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación con intensidades de degradación.

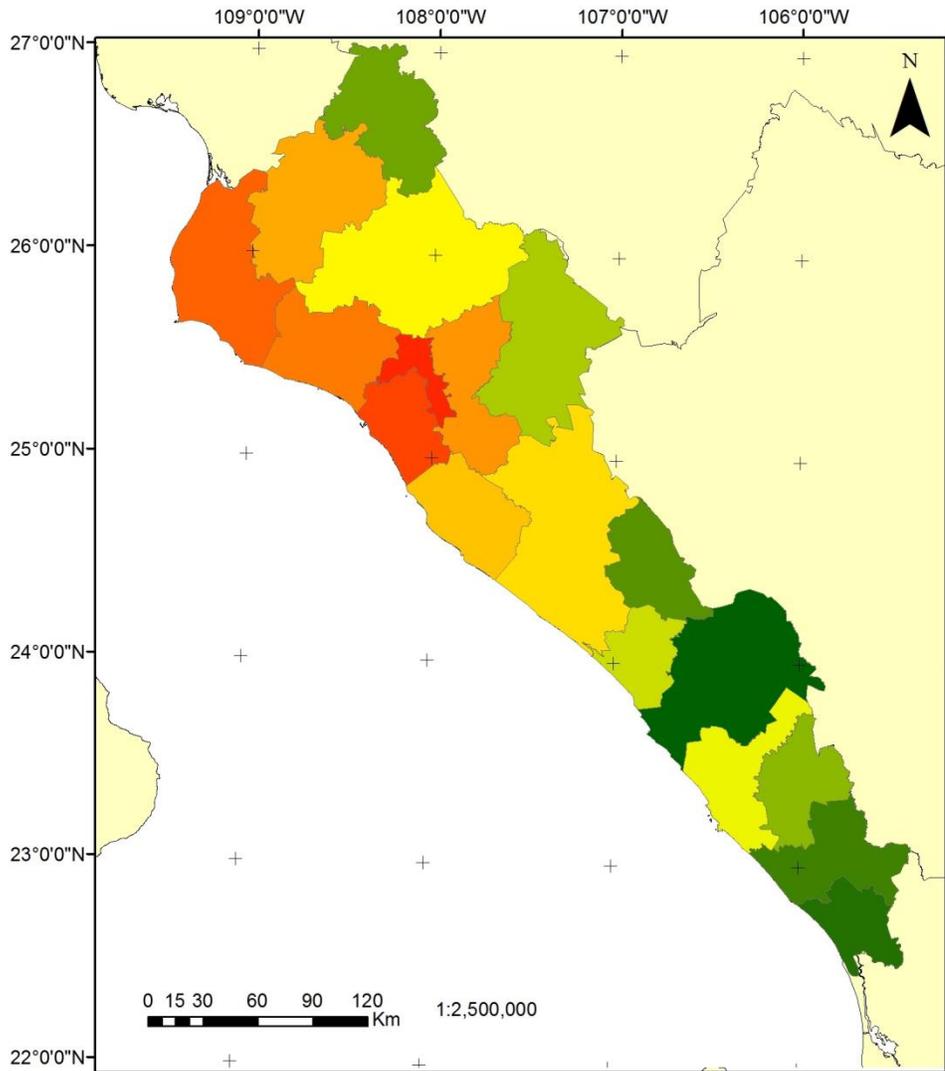
Intensidad de degradación	2003			2012		
	Min	Media	Max	Min	Media	Max
No existente	59	142.87	209	59	144	212
Ligero	113	157.64	206	111	157	200
Moderado	112	164.18	209	102	163	207
Fuerte*	----	----	----	---	---	---
Extremo	159	171.05	186	158	170	190

*Nivel de intensidad no presentado en el Estado de Sinaloa.

4.4.2. Zonas propensas a desertificación a nivel municipal

Los resultados obtenidos a nivel municipal se muestran en las Figuras 47 y 48. Los valores medios altos se muestran para ambos años (2003 y 2012) en los municipios Salvador Alvarado, Angostura, Ahome, Guasave y el Fuerte, debido, principalmente, a las condiciones antropogénicas, tales como: vías de comunicación, localidades, la actividad agrícola; y a las condiciones climáticas como altas temperaturas y precipitaciones menores a la media anual. Mientras que los valores medios más bajos en ambos años se dan en los municipios de San Ignacio, Escuinapa, Rosario, Cósala (en el año 2003), Badiraguato (en el año 2012) y Choix; ya que estos se localizan gran parte de su territorio enclavados en la zona serrana, aunado a las condiciones climáticas y redes hidrográficas. Los municipios de la zona centro-norte y centro-sur del estado se encuentran con valores intermedios posiblemente por las condiciones climáticas moderadas de la región y la densidad de vegetación de la zona,

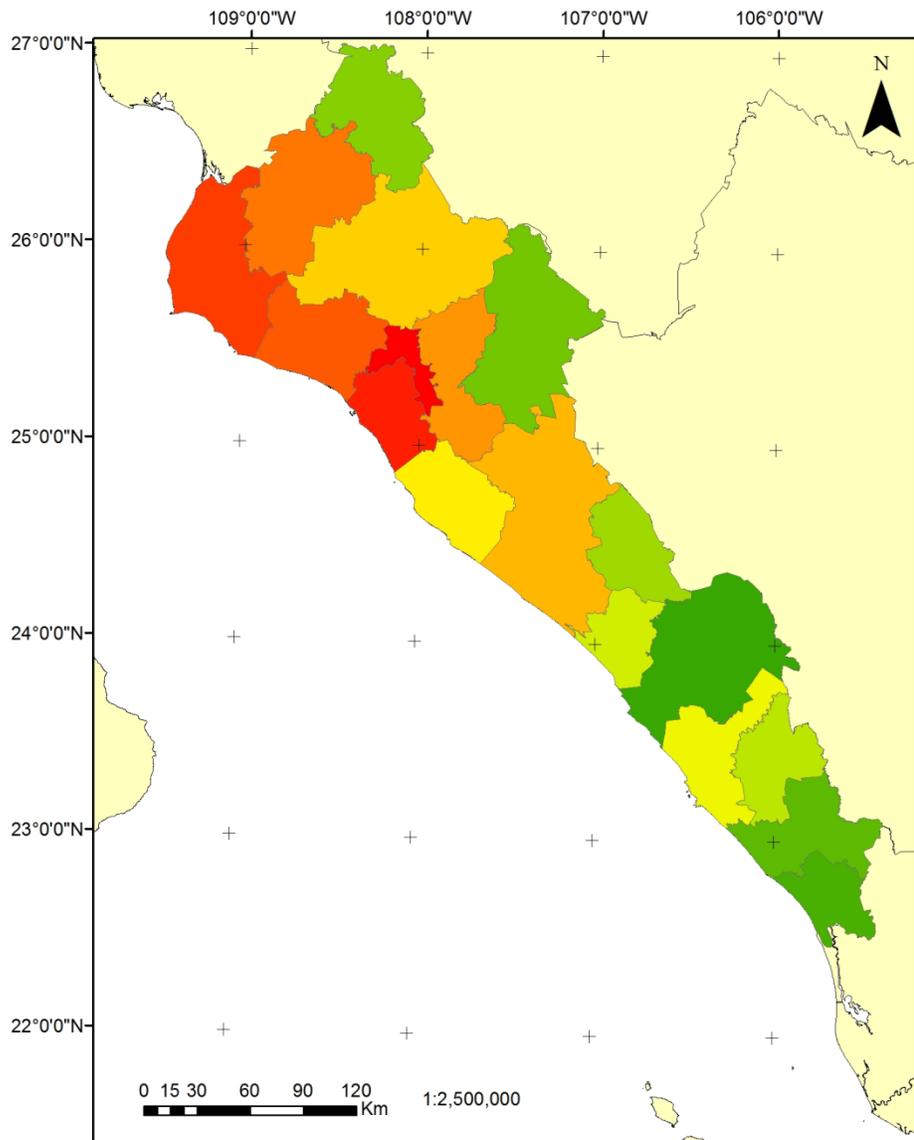
asimismo, se observa una zona de transición entre la parte desértica del norte y la parte tropical de sur del Estado (Figura 49).



Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en el año 2003

■ 178.74 - Salvador Alvarado	■ 149.56 - Mazatlán
■ 176.08 - Angostura	■ 144.20 - Elota
■ 172.69 - Ahome	■ 142.46 - Badiraguato
■ 169.32 - Guasave	■ 141.48 - Concordia
■ 168.51 - Mocorito	■ 138.97 - Choix
■ 167.60 - El Fuerte	■ 138.91 - Cosalá
■ 159.24 - Navolato	■ 136.51 - Rosario
■ 158.90 - Culiacán	■ 132.10 - Escuinapa
■ 158.67 - Sinaloa de Leyva	■ 118.06 - San Ignacio

Figura 47. Mapa de valores medios del IZPD a nivel municipal en el año 2003.



Valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en el año 2012

■ 176.96 - Salvador Alvarado	■ 148.89 - Mazatlán
■ 175.24 - Angostura	■ 147.53 - Elota
■ 172.26 - Ahome	■ 145.58 - Concordia
■ 169.69 - Guasave	■ 144.71 - Cosalá
■ 169.49 - El Fuerte	■ 141.73 - Choix
■ 166.37 - Mocorito	■ 140.07 - Badiraguato
■ 159.53 - Culiacán	■ 138.92 - Rosario
■ 159.39 - Sinaloa de Leyva	■ 131.18 - Escuinapa
■ 158.62 - Navolato	■ 120.55 - San Ignacio

Figura 48. Mapa de valores medios del IZPD a nivel municipal en el año 2012.

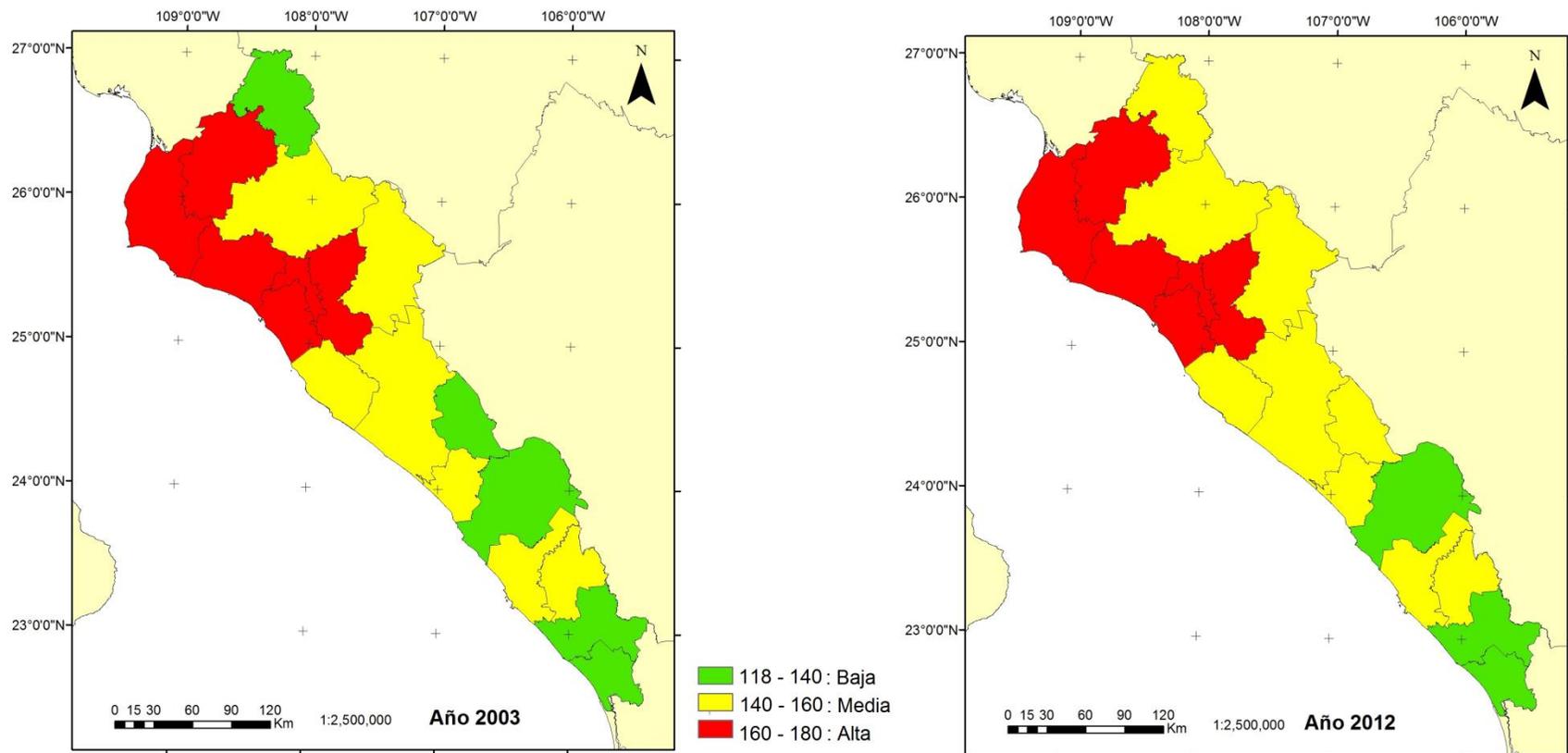


Figura 49. Discretización de los valores medios del índice de zonas propensas a desertificación en tres niveles ordinales en los años 2003 y 2012.

Capítulo 5. Conclusiones

El sensor MODIS posibilita la obtención de variables que permiten generar factores actualizados y de manera gratuita. Si dicha información se complementa con la que se dispone a nivel nacional de INEGI u otra institución, se puede integrar una base de datos geoespacial más enriquecida, en este caso particular, para el estudio de la desertificación.

Los productos MODIS son un excelente recursos para modelar las variables a utilizar, aun cuando para estudios que requieran de la escena (imagen) completa o varias escenas para trabajo de una gran extensión territorial se pueden tener casos donde la falta de información complique su representación temporal.

Los datos estadísticos de las estaciones meteorológicas a nivel estatal posibilitaron la generación del factor de precipitación y del índice de aridez, así como para dar robustez al momento de validar los modelos.

Por su parte, variables como el aumento de albedo y temperatura, son productos disponibles de manera gratuita y son indicadores relevantes para la detección de zonas propensas a desertificación. Es importante señalar que la obtención de dichas variables dispone de una máscara de nubes, lo que puede ocasionar que para cierto periodo del año no se tenga información total del área de estudio. En este caso, se utilizó el filtro de cuadro adaptativo para obtener valores faltantes acorde a su vecindad en imágenes con pocos pixeles faltantes.

Por otro lado, la utilización de los productos MODIS permite determinar en un periodo seleccionado de tiempo la deforestación ocurrida y con ello modelar el factor e incluirlo en el modelo. Dicho factor es importante porque permitió incluir en el modelo efectos secundarios, tales como: erosión hídrica y eólica, pérdida de la capa fértil del suelo, el aumento de la temperatura superficial, entre otros.

También la integración de la cartografía de uso de suelo y vegetación, topónimos y el producto MODIS MCD12Q1 permitieron el enriquecimiento de la variable de

asentamientos humanos, ya que a partir de estos se detectaron todas las localidades existentes para ambas fechas.

Una vez generadas todas las variables utilizadas en el modelo se obtuvo una base de datos geoespacial de gran relevancia, la cual consta de 16 variables espacio-temporal, para las fechas del año 2003 y 2012. Dicha base de datos servirá en un futuro para realizar diferentes trabajos de análisis y simulación geoespacial. Es importante dar seguimiento a la actualización e incremento de variables, en los diferentes criterios que se integraron: ambientales, antropogénicos, hídricos, suelo y vegetación. Asimismo, creemos relevante avanzar en la integración de variables socio-políticas y de percepción de los diferentes entes involucrados en trabajos de medio ambiente y cambio climático; además, buscar nuevas maneras de obtener los datos faltantes dentro de las imágenes.

En la correlación de las variables se muestra que la mayoría de ellas son independientes entre sí, con excepción de la temperatura con el índice de sequedad-temperatura-vegetación (TVDI). Esto ayudo al momento de dar los pesos a cada uno de los factores, compensando aquellos que presentaron una alta correlación.

La ponderación de los factores puede generar incertidumbre al momento de su asignación. En este sentido, se realizó la ponderación de cada factor acorde a la revisión bibliográfica y a la consulta de algunos expertos en el área. Para su asignación se utilizó el método de jerarquías analíticas de Saaty, el cual permitió generar los valores entre los criterios y factores para obtener el peso final y comparando en importancia cada uno de éstos, sin necesidad de dar valores arbitrariamente en forma generalizada, representando una homogeneización entre los factores que representan cada uno de ellos. En consecuencia los resultados se delimitan al número de factores que se utilizan para generar el modelo de desertificación.

En lo que respecta a los resultados podemos decir que se determinaron zonas vulnerables a desertificación en el Estado de Sinaloa en dos fechas (2003 y 2012), lo cual permite sentar las bases metodológicas para la simulación de modelos de desertificación en Sinaloa utilizando las Tecnologías de la Información Geográfica.

A la luz de los resultados obtenidos podemos decir que se ha obtenido un mapa continuo de valores de aptitud o zonas propensas a desertificación, no obstante, es necesario, continuar trabajando en la generación de una escala ordinal (por ejemplo: extremado, alto, moderado, bajo y nulo) apropiada para discriminar entre los diferentes niveles de desertificación según el mapa de IZPD obtenido, lo cual permitirá aplicarse de manera genérica a cualquier región del mundo. Además establecer métodos más exactos para estimar valores faltantes a partir de fuentes externas como es el caso de temperatura superficial donde se eliminaron aquellas imágenes en épocas de lluvia.

De esta forma la metodología desarrollada permite establecer de manera eficiente y temporal una estimación de las condiciones de vulnerabilidad a desertificación a partir del Índice de Zonas Propensas a Desertificación.

En resumen se puede puntualizar lo siguiente:

- 1) La creación de una base de datos geoespacial para el fenómeno de desertificación requiere tener actualizado las variables que se están usando para el estudio de desertificación. Asimismo integrar variables en el enfoque socio-económico.
- 2) La utilización de productos del sensor MODIS y su integración con otras variables temáticas de instituciones oficiales o privadas, así como de insumos generados, permiten tener datos actualizados, de calidad y a un costo económico y de tiempo muy bajo.
- 3) La modelación de las variables geoespaciales mediante análisis espacial requiere conocer la naturaleza de los datos y su representación anual.
- 4) Los resultados obtenidos muestran una distribución esperada de acuerdo a lo que se conoce de la región. Con el uso de distintas épocas de estudio se puede determinar aquellas áreas o focos de atención, donde el proceso de desertificación puede ir avanzando y descartar aquellas zonas de coincidencia. Al conocer esto se puede tomar medidas preventivas o de recuperación de los suelos.

- 5) Esta metodología puede ser considerada como las bases para generar, integrar y modelar las variables geoespaciales, en diferentes escenarios de desertificación en un horizonte temporal futuro.
- 6) Los distintos aspectos de validación de resultados permite sugerir que la metodología propuesta es un método viable para estimar la vulnerabilidad de zonas a desertificación.

5.1. Líneas futuras de investigación

- Explorar otras técnicas de análisis espacial (árbol de decisión, redes neuronales, técnicas de EMC restrictivas y/o borrosas, regresiones espaciales) para determinar zonas propensas a desertificación.
- Desarrollar metodologías de análisis de incertidumbre de los datos y análisis de sensibilidad de los modelos, con la finalidad de dar robustez a los resultados obtenidos en los modelos.
- Plantear una escala nominal para caracterizar áreas con altos indicios de desertificación.
- Desarrollar modelos de desertificación con intervalos de tiempo interanual.
- Desarrollar diferentes escenarios de desertificación a futuro para integrarlos en modelos de cambio climático.
- Realizar un trabajo exhaustivo de campo para recoger información sobre la fenología de la vegetación y suelos, misma que permita calibrar los índices (NVDI y TVDI), la humedad y la erosión.
- Elaborar cartografía de áreas específicas con problemas de desertificación con la ayuda de imágenes de mayor resolución.

Anexo

A. Factores e indicadores que inciden en la desertificación

Los factores e indicadores que se muestran a continuación es una recopilación bibliográfica.

Factores naturales

- Agotamiento de aguas subterráneas.
- Alteración de atmósfera – suelo – planta.
- Alteraciones climáticas por el incremento del albedo.
- Aridez todo el año.
- Alta variabilidad en las precipitaciones.
- Deterioro de la estabilidad estructural del suelo.
- Perdida natural de recursos forestales.
- Erosión hídrica y eólica.
- Incendios forestales.
- Tipos de suelo: material parental, fragmentación de rocas, profundidad del suelo, salinización, etc.
- Movimientos de dunas.
- Reducción de la disponibilidad hídrica.
- Reducción de materia orgánica.
- Sequías.

Factores antropogénicos

- Incremento de la población.
- Incendios de matorrales y bosques.
- Mal manejo del recurso hídrico que favorece el anegamiento y salinización de los suelos.
- Minería.

- Prácticas agrícolas: monocultivo, reducción de materia orgánica, encostramiento, compactación, pérdida de fertilidad y productividad de los suelos, prácticas y técnicas de laboreo inadecuados.
- Pérdida de biodiversidad.
- Procesos de urbanización.
- Salinización y alcalinización con aguas de mala calidad química.
- Sobrepastoreo.

Factores sociales

- Tasa de migración neta.
- Porcentaje de mujeres jefas de hogar.
- Densidad demográfica.
- Tasa media de crecimiento anual de la población.
- Estructura de edad.
- Incidencia de pobreza.
- Enfermedades de mayor incidencia.

Factores económicos

- Destino de los recursos de recuperación de tierras.
- Ingresos agrícolas de las familias.
- Producción para subsistencia.
- Expansión de la frontera agropecuaria.
- Tasa de soporte de especies en un hábitat.
- Tamaño de las propiedades rurales.
- Porcentaje de la población que utiliza leña y/o carbón como combustible.

B. Datos de precipitación

Tabla 24. Estaciones meteorológicas y precipitación acumulada (2003)

Municipio	Estación	Longitud W	Latitud N	Precipitación (mm)
Ahome	Higuera de Zaragoza	-109.33	25.98	225.6
Ahome	El Carrizo	-109.03	25.97	592.0
Ahome	Los Mochis	-109.00	25.80	292.4
Guasave	Ruiz Cortines	-108.73	25.72	286.1
Guasave	Zopilote	-108.33	25.72	583.0
Choix	Huites	-108.37	26.90	779.5
Choix	Choix	-108.27	26.73	666.7
El Fuerte	El Mahome	-108.60	26.52	462.2
Choix	Yecorato	-108.30	26.37	816.1
El Fuerte	Las Estacas	-108.72	26.03	293.8
El Fuerte	Bocatoma Sufragio	-108.78	26.08	275.1
Sinaloa	Jaina	-108.01	25.90	879.9
Badiraguato	Surutato	-107.35	25.88	98.9
Angostura	El Playón	-108.18	25.25	300.7
Mocorito	Rosa Morada	-107.83	25.40	80.0
Badiraguato	Guaténipa	-107.23	25.35	1011.6
Mocorito	Pericos	-107.78	25.08	626.5
Badiraguato	El Varejonal	-107.40	25.10	704.0
Culiacán	Navolato	-107.68	24.78	484.5
Culiacán	Altata	-107.53	24.55	101.8
Culiacán	Alto de Culiacancito	-107.53	24.80	334.0
Culiacán	Culiacán	-107.40	24.82	664.2
Culiacán	San Joaquín	-107.38	24.75	771.5
Culiacán	Sanalona	-107.15	24.80	774.3
Cósala	Presa El Comedero	-106.82	24.60	1680.0
Cósala	Santa Cruz de Alaya	-106.85	24.50	730.6
Cósala	Nuestra Señora	-106.60	24.38	0.0
San Ignacio	Guadalupe de los Reyes	-106.50	24.23	2355.9
San Ignacio	Acatitán	-106.65	24.07	792.9
San Ignacio	Ixpalino	-106.62	23.95	851.3
San Ignacio	Dimas	-106.78	23.73	56.4
Mazatlán	El Quemado	-106.48	23.50	464.3

Continúa en la siguiente página.

Tabla 25 – Continuación de la página anterior.

Municipio	Estación	Longitud W	Latitud N	Precipitación (mm)
Mazatlán	Siqueros	-106.25	23.35	568.9
Rosario	Las Tortugas	-105.85	23.08	790.0
Rosario	Otatitlan	-105.67	23.01	749.7
Rosario	La Concha	-105.47	22.53	295.0

Tabla 25. Estaciones meteorológicas y precipitación acumulada (2012).

Municipio	Estación	Longitud	Latitud	Precipitación (mm)
Ahome	Chávez Talamantes	-109.03	26.33	378.0
Ahome	Agrícola Gotsis	-109.01	26.24	105.2
Ahome	Ahome	-109.21	25.85	328.6
Ahome	El Guayabo	-109.13	25.94	15.2
Ahome	Higuera de Zaragoza	-108.22	26.02	0.6
Ahome	Lousiana	-109.09	25.78	288.0
Ahome	Campo Tiaxtes	-108.95	25.88	0.0
Ahome	Chaves Talamante	-109.03	26.33	237.0
Ahome	Ejido Chihuahita	-109.00	26.14	188.0
Ahome	Ejido Lousiana	-109.09	25.78	175.8
Ahome	El Carrizo	-109.01	26.24	78.6
Ahome	El Guayabo	-109.13	25.94	15.2
Ahome	Higueras de Zaragoza	-109.32	26.02	31.6
Ahome	Módulo Mavari	-109.27	25.99	2.2
Ahome	Macapul	-109.16	25.91	238.6
Angostura	Chinitos	-107.90	25.05	251.0
Angostura	La Esperanza	-108.21	25.31	296.4
Angostura	Tatemita	-108.04	25.27	696.6
Badiraguato	Los Sitios	-107.64	25.49	585.8
Badiraguato	Surutato	-107.56	25.80	562.8
Concordia	Concordia	-106.02	23.29	92.8
Concordia	La Querencia	-106.02	23.29	92.2
Culiacán	Base Culiacán	-107.45	24.73	628.2
Culiacán	Aguaruto	-107.51	24.76	457.2
Culiacán	Costa Rica	-107.41	24.54	488.0
Culiacán	El Dorado	-107.37	24.33	324.2
Culiacán	El Limón de los Ramos	-107.49	24.88	635.4
Culiacán	Facultad de Agronomía	-107.44	24.62	474.0
Culiacán	La Campaña	-107.57	24.99	41.0
Culiacán	Mojolo	-107.44	24.93	664.4
Culiacán	Sánchez Celis	-107.40	24.43	241.4
El Fuerte	Camoja	-108.82	25.94	471.4
El Fuerte	El Carrizo	-109.00	26.14	275.2
El Fuerte	La Genoveva	-108.98	25.86	199.2
El Fuerte	Taxtes	-108.95	25.88	0.0
El Rosario	Poblado Camoja	-109.21	25.85	2731.2
El Rosario	Chametla	-105.87	22.91	262.0
El Rosario	Los Pozos	-106.18	23.02	809.4
El Rosario	Tablón Viejo	-106.02	23.08	685.0
Elota	Ejido Culiacán	-106.99	24.01	136.6
Elota	La Cruz	-106.89	23.89	484.2
Elota	Ejido Culiacán	-106.99	24.01	140.1
Elota	Estación Obispo	-107.18	24.25	505.2
Elota	La Cruz	-106.89	23.89	486.2
Escuinapa	Escuinapa	-105.87	22.75	82.6
Escuinapa	Escuinapa	-105.74	22.80	819.6

Continúa en la siguiente página

Tabla 26. Continúa de la página anterior.

Municipio	Estación	Longitud	Latitud	Precipitación (mm)
Guasave	Bamoa	-108.33	25.67	654.4
Guasave	El Cubilete	-108.50	25.52	459.2
Guasave	La Curva	-108.22	25.50	602.2
Guasave	Leyva Solano	-108.64	25.63	353.8
Guasave	Palos Blancos	-108.32	25.55	18.4
Guasave	Rojo Gómez	-108.38	25.50	0.0
Guasave	Ruíz Cortínez	-108.75	25.65	247.2
Guasave	Batamote	-108.64	25.63	286.0
Guasave	Campo Díaz	-108.50	25.52	301.0
Guasave	Estación Bamoa	-108.33	25.67	550.0
Guasave	Las Brisas	-108.22	25.50	454.2
Guasave	Miguel Leyson	-108.38	25.50	0.0
Guasave	Palos Blancos	-108.32	25.55	11.2
Guasave	Ruíz Cortínez	-108.75	25.65	186.0
Mazatlán	Los Pozos	-106.18	23.02	809.4
Mazatlán	Walamo	-106.23	23.14	667.2
Mazatlán	Mármol	-106.50	23.50	556.0
Mazatlán	Walamo	-106.23	23.14	667.6
Mocorito	Higuera de los Vegas	-107.96	25.65	271.6
Mocorito	Pericos	-107.66	25.06	565.6
Navolato	Navolato	-107.74	24.72	1.4
Navolato	Ejido 5 Hermanos	-107.86	24.83	522.6
Navolato	El Vergel	-107.80	24.71	313.2
Navolato	Juan Aldama	-107.81	24.93	672.8
Navolato	Sataya	-107.66	24.64	397.0
Navolato	Tobolopo	-107.76	24.72	429.2
Navolato	Villa Ángel Flores	-107.69	24.86	989.2
Navolato	Villa Juárez	-107.54	24.61	319.2
San Ignacio	Dimas	-106.82	23.73	554.2
San Ignacio	San José	-106.50	23.50	556.0
San Ignacio	Estación Dimas	-106.82	23.73	548.0
San Ignacio	La Labor	-106.47	23.84	497.4
Sinaloa de Leyva	Sinaloa de Leyva	-108.22	25.83	680.4
Sinaloa de Leyva	AARSO Oficinas	-108.22	25.83	574.6

Bibliografía

- [1] Abraham, E. M. (2008). Tierras secas, desertificación y recursos hídricos. *Ecosistemas: Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 17(1):1–4.
- [2] Almorox Alonso, J., López Bermúdez, F., y Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación*. EDITUM GAIA. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.
- [3] Amiraslani, F. y Dragovich, D. (2011). Combating desertification in iran over the last 50 years: An overview of changing approaches. *Journal of Environmental Management*, 92(1):1 – 13.
- [4] Anaya Acevedo, J. A. (2009). *Estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para colombia basado en imágenes satelitales*. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá, España.
- [5] Bakr, N., Weindorf, D. C., Bahnassy, M. H., y El-Badawi, M. M. (2012). Multi-temporal assessment of land sensitivity to desertification in a fragile agro-ecosystem: Environmental indicators. *Ecological Indicators*, 15(1):271 – 280.
- [6] Bautista Zuñiga, F., editor (2011). *Técnicas de muestreos para manejadores de recursos naturales*. Centro de investigaciones en geografía ambiental, 2 edición.
- [7] Castro Díaz, I. R. (2009). Metodología de validación de productos MODIS para la estimación de temperatura de la superficie en zonas heterogéneas y homogéneas de Colombia. Maestría en geomática, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía.
- [8] Cescatti, A., Marcolla, B., Santhana Vannan, S. K., Pan, J. Y., Román, M. O., Yang, X., Ciais, P., B., C. R., Law, B. E., Matteucci, G., Migliavacca, M., Moors, E., Richardson, A. D., Seufert, G., y Schaaf, C. B. (2012). Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global fluxnet network. *Remote sensing of environment*, (121):323 – 334.
- [9] Changzhen, Y., Wang, T., y Han, Z. (2005). Using modis data to assess land desertification in ordos plateau – mu us sandy land case study. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, volumen 4, páginas 2373–2375.

- [10] Chapela, G. (2004). Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global. En Martínez, J. y Fernández Bremauntz, A., editores, *Cambio climático: una visión de México*, capítulo Reacción del mundo ante el problema: la colaboración internacional, páginas 187–198. SEMARNAT, INE.
- [11] Chen, C.-F., Son, N.-T., Chang, L.-Y., y Chen, C.-C. (2011). Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the vietnamese mekong delta using {MODIS} data. *Applied Geography*, 31(2):463 – 475.
- [12] Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, España, 3ra edición.
- [13] CICEANA (2007). Saber más... percepción remota. CICEANA: Centro de información y comunicación ambiental del Norte América, A.C.
- [14] CNE (1991). Informe de la situación general en la materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1989-1990. Informe, CNE: Comisión Nacional de Ecología, México.
- [15] CNUCLD (2007). Directrices para actualizar el atlas mundial de la desertificación. Informe de la quinta reunión del grupo de expertos del comité de ciencia y tecnología. url: <http://archive.unccd.int/cop/officialdocs/cop8/pdf/cst2add9spa.pdf>.
- [16] CONAFOR y SEMARNAT (2010). Día mundial de la lucha contra la desertificación y la sequía.
- [17] Dascal, G. (2012). La vulnerabilidad de las tierras desertificadas frente a escenarios de cambio climático en américa latina y el caribe. Publicaciones de las naciones unidas, Naciones Unidas: CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). The Global Mechanism: United Nations Convention To Desertification.
- [18] Dawelbait, M. y Morari, F. (2012). Monitoring desertification in a savannah region in sudan using landsat images and spectral mixture analysis. *Journal of Arid Environments*, 80(0):45 – 55. Accesado: 06 de Octubre de 2012.
- [19] De Santa Olalla Mañas, F. M. (2001). *Agricultura y Desertificación*. Mundi-Prensa.
- [20] Domínguez Bravo, J. (2000). Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica. Informe técnico 943, Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España).
- [21] Duanyang, X., Chunlei, L., y Xiao, S. (2012). The research of the quantitative method of desertification assessment at large scale based on modis data and decision tree model - a case

- study in farming-pastoral region of north china. En *Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2012 2nd International Conference on*, páginas 1–4.
- [22] Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva: Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark Labs, 17 edición.
- [23] Fang, L., Bai, Z., Wei, S., Yanfen, H., Zongming, W., Kaishan, S., Dianwei, L., y Zhiming, L. (2008). Sandy desertification change and its driving forces in western jilin province, north china. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136:379–390.
- [24] FAO (2007). Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos 102, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia. url: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/y5738s>.
- [25] Farajzadeh, M. y Egbal, M. N. (2007). Evaluation of MEDALUS model for desertification hazard zonation using GIS. *Pakistan Journal of Biology Science*, 10(16):2622–2630.
- [26] FIDA (2010). *Desertificación*. FIDA: Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola.
- [27] Gad, A. y Shalaby, A. (2010). Assessment and mapping of desertification sensitive using remote sensing and gis casa study: Inland sinai and eastern desert wadies. Cairo, Egipto. Space Technology and Geo-Information for sustainable development.
- [28] García Mora, T. J. y Francois, M. J. (2011a). MODLAND: los productos de superficie terrestre MODIS. En Mas, J. F., editor, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, capítulo 2, páginas 25–70. SEMARNAT, INE, UNAM y CIGA, México.
- [29] García Mora, T. J. y Francois, M. J. (2011b). Presentación del sensor MODIS. En Mas, J. F., editor, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, capítulo 1, páginas 11 – 24. SEMARNAT, INE, UNAM y CIGA, México.
- [30] García Mora, T. J., Francois, M. J., y Hinkley, E. A. (2011). Una revisión del uso de modis para el mapeo y monitoreo de las cubiertas terrestres. En Mas, J. F., editor, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, capítulo 4, páginas 97 – 122. SEMARNAT, INE, UNAM y CIGA, México.
- [31] García Mora, T. J. y Mas, J. F. (2011). Evaluación de imágenes del sensor modis para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1):83 – 94.
- [32] Glantz, M. H. y Orlovsky, N. (1983). Desertification: A review of the concept. <http://www.ciesin.org/docs/002-479/002-479.html>. Accesado: 20 de Abril de 2013.

- [33] Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación el territorio*. Ra-Ma.
- [34] Graña, M. (2007). Desertificación. *ICIENCIA: Publicación electrónica, Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SeCyT)*, 5(15):1–11.
- [35] GreenFacts (2006). Consenso científico sobre la desertificación. <http://www.greenfacts.org/es/desertificacion/desertificacion-greenfacts.pdf>.
- [36] Greenpeace (2006). Desertificación y sequía. <http://estaticos.elmundo.es/especiales/2007/02/ciencia/cambioclimatico/documentos/desertizacion.pdf>. Accesado: 10 de Abril de 2013.
- [37] Guo, M. y Li, X. (2005). Monitoring sandy desertification of minqin oasis, northwest china by remote sensing and gis. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, volumen 1, páginas 4 pp.–.
- [38] Gutiérrez Puebla, J. y Gould, M. (2002). *SIG: Sistemas de información geográfica*. Espacio y sociedades. Editorial Síntesis, España, 2a edición.
- [39] Guzmán, A. (2012). Desertificación: la amenaza. *México Social: An elegant magazine theme for Joomla*.
- [40] Guzmán Fernández, D. C. (2010). Proceso de desertificación en el valle central de Tarija. aplicando un modelo basado en indicadores espectrales. Tesis de maestría, Universidad Mayor de San Simón Vicerrectorado. Centro de levantamientos aeroespaciales y aplicaciones SGI para el desarrollo sostenible de los recursos naturales.
- [41] Gómez Piñeiro, F. J. (1992). Los sistemas de información geográfica: su importancia y su utilidad en los estudios medioambientales. *Cuadernos de sección. Historia 20*, páginas 455–465.
- [42] Hao, C. Y. y Zhao, T. Q. (2010). Study on relationship between landuse conversions and land desertification in mu us sandland region. En *2nd Conference on enviromental science and information application technology*, páginas 440–442.
- [43] Heinsch, F. A., Reeves, M., Votava, P., Kang, S., Milesi, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W. M., Loehman, R., Bowker, C. F., Kimball, J. S., Nemani, R. R., y Running, S. W. (2003). User's guide gpp and npp (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Reporte Técnico 2, Modis Land team.
- [44] Helldén, U. (2008). A coupled human-environment model for desertification simulation and impact studies. *Global and Planetary Change*, 64:158 – 168.

- [45] Hernández, A. M., Gagliardini, A., y Moragues, J. A. (2002). *Uso de la información espacial en clima, hidrología y oceanografía*. Ciclos de información espacial completos.
- [46] Hernández Cerda, M. E., Valdés Madero, G., y Miranda Salgado, B. (2009). Proceso de desertificación. En Hernández Santana, J. R. y Bollo Manent, M., editores, *I-II caracterización y diagnóstico para el ordenamiento ecológico general del territorio (POEGT)*, capítulo Proceso de degradación ambiental, páginas 70–89. SEMARNAT, INE, UNAM, Universidad Autónoma de Querétaro.
- [47] Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., y Sommer, S. (2008). Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. *Global and Planetary Change*, 64(3–4):146 – 157.
- [48] Holtz, U. (2003). La convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación (CNULD) y su dimensión política. Documento para la quinta mesa redonda de parlamentarios en el contexto CNULD.
- [49] Holtzman, M. E. (2012). *Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índice de vegetación*. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur.
- [50] Humboldt (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1):107–116.
- [51] Huo, A., Xie, J., Sun, Z., y Zhou, L. (2011). Methodology of land surface broadband albedo retrieval in the desertification area based on modis image data. En *Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011 International Symposium on*, volumen 4, páginas 2539–2542.
- [52] INAFED (2010). http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELDCAL/EMM_sinaloa. Accesado: 01 de Abril de 2013.
- [53] INEGI (2012). *Anuario estadístico de Sinaloa 2012*. INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- [54] Kasimu, A. y Tateishi, R. (2010). Extraction area at risk of desertification using modis and geophysical data: In xinjiang uyghur autonomous region of china. En *Multimedia Technology (ICMT), 2010 International Conference on*, páginas 1–4.
- [55] Kosma, C., Kirkby, M., y Geeson, N. (1999). *The medalus project: Mediterranean desertification and land use*. European Communities.

- [56] Li, C., Chen, X., Chen, Y., Fu, K., y Liu, Q. (2007). Land desertification and some proposals for promoting sustainable development in qinghai lake area, china. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, páginas 3444–3447.
- [57] Liu, A., Liu, Z., Wang, C., Niu, Z., y Yan, D. (2003). Monitoring of desertification in central asia and western china using long term NOAA-AVHRR NDVI time-series data. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, volumen 4, páginas 2278 – 2280.
- [58] Lowry, J. (2007). La utilización de programas y datos de SIG de bajo costo para inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Informes técnicos Rasmar 02, Rasmar.
- [59] Lucioni, N. y Schonwandt, D. (Sin fecha). Sistemas de información geográfica y teledetección: Sus aplicaciones como técnicas para el desarrollo de modelos espaciales. *Revista Espacio*.
- [60] López Beltrán, M. A. (2011). Respuesta de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) a la fertilización orgánica e incidencia de insectos plagas. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Agronomía.
- [61] López Bermúdez, F. (2006). Desertificación, un riesgo ambiental global de graves consecuencias. *Revista Cuaternario & Geomorfología (C&G)*, 20(3-4):61 – 71.
- [62] Macango, P., Parada, S., Trajano, V., Brzovic, F., y Faúndez, J. E. (2005). Proceso de consulta local sobre desertificación e indicadores. En Morales, C. y Parada, S., editores, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*, número 87, capítulo 6, páginas 151 – 214. Publicación de las Naciones Unidas.
- [63] Madrigal Gómez, J. M. y López Caloca, A. A. (2009). Modelo de desertificación utilizando imágenes multiespectrales, en cuatro cienegas, coahuila, México. En *Ponencias en el XIV Simposio Internacional SELPER 2010*.
- [64] Maeden, G. J. y Kapetsky, J. M. (1992). Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. Documento técnico de pesca 318, FAO: Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, Roma, Italia.
- [65] Maosheng Zhaoa, Faith Ann Heinscha, R. R. N. S. W. R. (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote sensing of enviroment*, (95):167–176.
- [66] Matallo Jr, H. (2005). Algunas cuestiones relativas a la economía de la desertificación. En Morales, C. y Parada, S., editores, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*, número 87, capítulo 4, páginas 113 – 138. Publicación de las Naciones Unidas.

- [67] Meléndez Pastor, I., Navarro Pedraño, J., Gómez, I., y Koch, M. (2009). Análisis de series temporales de vegetación obtenidas mediante teledetección como herramienta para el seguimiento de procesos de desertificación. *Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes*, páginas 339 – 342.
- [68] Mena, U. (2007). Aplicación de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil. <http://www.iie.org.mx/boletin022007/tend.pdf>. Accesado: 01 de Noviembre de 2011.
- [69] MODIS (2011). MODIS products table. https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table. Accesado: 05 de Mayo de 2013.
- [70] Morales, C. (2005). Pobreza desertificación y degradación de tierras. En Morales, C. y Parada, S., editores, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*, número 87, capítulo 1, páginas 25 – 58. Publicación de las Naciones Unidas.
- [71] Morrás, H. J. (2008). El suelo, la delgada piel del planeta. *Ciencia Hoy*, 18(103):22–27.
- [72] Navone, S. M., Espoz Alsina, C., Maggi, A. E., y Introcaso, R. (2002). Monitoreo de la desertificación en los valles semiáridos del noroeste argentino: desarrollo de un sistema de información geográfica empleando indicadores biofísicos y socioeconómicos. *Revista de teledetección*, 18:5–19.
- [73] Norzagaray Campos, M., Espinoza Carreón, L., Muñoz Sevilla, P., y Rosales A., A. G. (2011). Condiciones físico-químicas del suelo y su asociación con la desertificación a través del análisis espectral en suelos del valle de Guasave, Sinaloa. En Piedad Sánchez, N., Rosales Sosa, G., Santoyo Gutierrez, E. R., y Guevara García, M., editores, *Actas INAGEQ (Instituto Nacional de Geoquímica). XXI Congreso Nacional de Geoquímica*, volumen 17, páginas 97–102, Monclova, Coahuila de Zaragoza, México.
- [74] NRCS (2003). Global desertification vulnerability map. <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/mapindex/desert.html>. Accesado: 07 de Enero de 2013.
- [75] NTSG (2013). Modis GPP/NPP project mod17. <http://www.ntsg.umd.edu/project/mod17>. Accesado: 07 de Enero de 2013.
- [76] Oropeza Orozco, O. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación. En Martínez, J. y Fernández Bremauntz, A., editores, *Cambio climático: una visión de México*, capítulo Impactos, vulnerabilidad y adaptación, páginas 301–312. SEMARNAT, INE.
- [77] Ouyang, W., Hao, F., Skidmore, A. K., Groen, T. A., Toxopeus, A., y Wang, T. (2012). Integration of multi-sensor data to assess grassland dynamics in a yellow river sub-watershed. *Ecological Indicators*, 18(0):163 – 170.

- [78] Pando Moreno, M., Gutiérrez G., M., Maldonado H., A., y Jurado, E. (2002). Evaluación de los procesos de desertificación en una cuenca hidrológica del ne de México. *Ciencia UANL*, 5(004):519–524.
- [79] Parada, S. (2005). El sistema de indicadores socioeconómicos de la desertificación. En Morales, C. y Parada, S., editores, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*, número 87, capítulo 1, páginas 139– 150. Publicación de las Naciones Unidas.
- [80] Parada, S. y Faúndez, J. E. (Sin fecha). Sistema de indicadores socio económicos sobre los impactos de la desertificación para el combate contra la desertificación Bolivia, Ecuador y Peru. Informe final, CEPA.
- [81] Petta, R. A., Vespoli de Carvalho, L., Erasmi, S., y Jones, C. (2013). Evaluation of desertification processes in Seridó Region (NE Brazil). *International Journal of Geosciences*, 4:12–17.
- [82] Peña Llopis, J. (2008). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Editorial Club Universitario.
- [83] Qin, Z., Xu, B., Xin, X., Zhou, Q., Zhang, H., y Liu, J. (2004). Integration of remote sensing and gis technology to evaluate grassland ecosystem health in north china. En *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International*, volumen 6, páginas 4034–4037 vol.6.
- [84] Rasmy, M., Gad, A., Abdelsalam, H., y Siwailam, M. (2010). A dynamic simulation model of desertification in egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 13(2):101 – 111.
- [85] Reich, P. F., Numbem, S. T., Almaraz, R. A., y Eswaran, H. (2001). Land resource stresses and desertification in Africa.
- [86] Reynolds, J. F., Grainger, A., Stafford Smith, D. M., Bastin, G., Garcia-Barrios, L., Fernández, R. J., Janssen, M. A., Jürgens, N., Scholes, R. J., Veldkamp, A., Verstraete, M. M., Von Maltitz, G., y Zdruli, P. (2011). Scientific concepts for an integrated analysis of desertification. *Land Degradation & Development*, 22(2):166–183.
- [87] Reynolds, J. F. y Stafford Smith, D. M. (2002). *Global desertification: do humans cause deserts?*, capítulo Do humans cause deserts?, páginas 1–21. Dohlem Workshop Report 88, Dahlem University Press.
- [88] Río, J. (2010). *Introducción al tratamiento de datos espaciales en hidrología*. Bubok Publishing.

- [89] Robert, W. (2012). MODIS land. <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/>. Accesado: 05 de Noviembre de 2012.
- [90] Rodríguez Chavez, O. E. y Arredondo Bautista, H. A. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicados en estudios de ingeniería civil. Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- [91] Rodríguez Jaime, M. J. (2000). *Modelos socio-demográficos*. Tesis doctoral, Departamento de sociología y Teoría de la educación, Programa de Licenciatura y doctorado en sociología, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Alicante.
- [92] Rubio, Y., Beltrán, A., Avilez, F., De la Parra, S., y Alejandro, S. (2006). Reserva ecológica universitaria del mineral de nuestra señora Cosalá, Sinaloa, México: Hacia un manejo integral de la biodiversidad. En *V Congreso internacional de ciencias ambientales y XI congreso nacional de ciencias ambientales*.
- [93] Ruiz Corral, J. A., Medina García, G., Macías Cervantes, J., Silva Serna, M. M., y Díaz Padilla, G. (2005). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Sinaloa. Libro técnico 2, INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- [94] Sandholt, I., Rasmussen, K., y Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote sensing of environment*, (79):213–224.
- [95] Santini, M., Caccamo, G., Laurenti, A., Noce, S., y Valentini, R. (2010). A multi-component GIS framework for desertification risk assessment by an integrated index. *Applied Geography*, 30(3):394 – 415.
- [96] Schaaf, C. (2011). MODIS BRDF/albedo producto (MOD43 user's guide). <http://www-modis.bu.edu/brdf/userguide/index.html>. Accesado: 05 de Noviembre de 2012.
- [97] Schaaf, T. (2006). Desertificación y zonas áridas. Texto informativo, Oficina de información pública MEMOBPI.
- [98] SEMARNAT (2002). La degradación de suelos en México. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/03_suelos/recuadros/c_rec3_03.htm. Accesado: 20 de Octubre de 2012.
- [99] SEMARNAT (2005). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales*. Informes de la situación del medio ambiente en México. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, México, 2005 edición.

- [100] SEMARNAT (2008). Impacto humano en el medio ambiente. http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/documents/sniarn/pdf/yelmedioambiente/version_2008/1_impacto_humano_v08.pdf. Accesado: 20 de Junio de 2013.
- [101] SEMARNAT (2008). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales*. Informes de la situación del medio ambiente en México. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, México, 2008 edición.
- [102] SEMARNAT (2009). http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/bitacora_cuenca_valle_mexico/diagnostico_final%2022_marzo_1.pdf. Accesado: 11 de Diciembre de 2012.
- [103] SEMARNAT (2013). *Informe de la situación del medio ambiente en México: compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental*. SEMARNAT: Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, 2012 edición.
- [104] SEPYC (2010). *Educación ambiental y sustentabilidad en Sinaloa*. Secretaría de Educación Pública y Cultura (SEPYC). Gobierno del Estado de Sinaloa.
- [105] Sobrino Rodríguez, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de Valencia, España.
- [106] Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., y Huete, A. (2004). *MODIS Vegetation Index User's Guide*. Vegetation Index and Phenology Lab. University of California, Santa Barbara.
- [107] Solis Cámara, A. B. y Vázquez Miranda, R. (Sin fecha). Plan estatal de acción ante el cambio climático peacc: Áreas susceptibles de desertificación en baja california sur. http://spyde.bcs.gob.mx/cgds/files/proyectos/PEACC/Reporte_Final_DESERTIFICACION_PEACC-BCS.pdf. Accesado: 13 de Diciembre de 2012.
- [108] SRE (2011). México reitera su compromiso en la lucha contra la desertificación, la degradación de suelos y la sequía grave. <http://saladeprensa.sre.gob.mx/index.php/es/comunicados/36-312>. Accesado: 07 de Noviembre de 2012.
- [109] Strahler, A. H. y Muller, J. (1999). MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version 5.0. Reporte técnico.
- [110] Torres, L. M., Abraham, E. M., Montaña, E., y Torres, E. (2005). Las dimensiones socioeconómicas de la desertificación: avances en la utilización de indicadores. un ejercicio en el caso de mendoza, argentina. En Morales, C. y Parada, S., editores, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*, número 87, capítulo 7, páginas 215 – 234. Publicación de las Naciones Unidas.

- [111] UNCCD (2013). Land scan - what's new - n° 14-17/2013. http://www.unccd.int/LandScan/UNCCD%20Land%20Scan%20No%2014_17_2013.pdf. Accesado: 29 de Abril de 2013.
- [112] UNEP (2002). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO-3: Pasado, Presente y Futuro*, capítulo Tierras, páginas 62 – 89. UNEP: United Nations Environment Programme: environment for development. PNUMA y Ediciones Mundiprensa.
- [113] USGS (2007). Geographic information systems. http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/. Accesado: 26 de Noviembre de 2011.
- [114] USGS (2011). MODIS overview. https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_overview. Accesado: 05 de Noviembre de 2012.
- [115] Vargas Cuervo, G. y Gómez, C. E. (2003). La desertificación en Colombia y el cambio climático. *Cuadernos de geografía*, 12(1-2):121–134.
- [116] Velasco Bautista, E. (2012). Funciones de biomasa y carbono aéreo aplicables a árboles de pinus pseudostrobus lindl. en México. *Sociedad española de ciencias forestales*, 34:315–319.
- [117] Vermote, E. F., Kotchenova, S. Y., y Ray, J. P. (2011). *MODIS Surface Reflectance User's Guide*.
- [118] Wan, Z. (1999). *MODIS Land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)*. University of California.
- [119] Wan, Z. (2007). *MODIS Land Surface Temperature Products User's Guide*. University of California, Santa Barbara.
- [120] Wang, X., Chen, F., Hasi, E., y Li, J. (2008). Desertification in China: An assessment. *Earth-Science Reviews*, 88(3–4):188 – 206.
- [121] Wang, Z., Schaaf, C. B., Chopping, M. J., Strahler, A. H., Wang, J., Roman, M. O., Rocha, A. V., Woodcock, C. E., y Shuai, Y. (2012). Evaluation of moderate-resolution imaging spectroradiometer (modis) snow albedo product (mcd43a) over tundra. *Remote Sensing of Environment*, 117(0):264 – 280.
- [122] Xiong, X., Chiang, K., Sun, J., Barnes, W., Guenther, B., y Salomonson, V. (2009). NASA EOS terra and aqua MODIS on-orbit performance. *Advances in Space Research*, 43(3):413 – 422.
- [123] Xu, D., Kang, X., Liu, Z., Zhuang, D., y Pan, J. (2009). Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(6):855–868.

- [124] Xu, D., Kang, X., Zhuang, D., y Pan, J. (2010). Multi-scale quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification – a case study of the ordos plateau, china. *Journal of Arid Environments*, 74(4):498 – 507.
- [125] Yan, C. Z., Song, X., Zhou, Y. M. Duan, H. C., y Li, S. (2009). Assessment of aeolian desertification trends from 1975's to 2005's in the watershed of the longyangxia reservoir in the upper reaches of china's yellow river. *Geomorphology*, 112:205–211.
- [126] Yáñez, J. y González, J. (2005). *Sistemas de Información Medioambiental*. Enseñanzas Técnicas. Netbiblo SI.
- [127] Yuan, S., Xv, J., y Yang, L. (2006). The impact of dunhuang railway construction on land desertification. *Journal of Geographical Sciences*, 16(1):99–104.
- [128] Zhang, C., Niu, S., y Xu, D. (2010). Monitoring of desertification in inner mongolia based on modis data. En *Information and Computing (ICIC), 2010 Third International Conference on*, volumen 3, páginas 322–324.
- [129] Zhang, Y., Chen, Z., Zhu, B., Luo, X., Guan, Y., Guo, S., y Nie, Y. (2008). Land desertification monitoring and assessment in yulin of northwest china using remote sensing and geographic information systems (gis). *Environmental Monitoring and Assessment*, 147(1-3):327–337.
- [130] Zucca, C., Della Peruta, R., Salvia, R., Sommer, S., y Cherlet, M. (2011). Towards a world desertification atlas. relating and selecting indicators and data sets to represents complex issues. *Ecological indicators*, 15(1):157–170.