



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas**

**Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio  
Ambiente en Zonas Áridas**

**Definición de la línea base de degradación de la tierra en  
México a escala sub-nacional**

**TESIS**

**Que como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**



**Presenta:**

**GEORGINA PÉREZ RODRÍGUEZ**



**Bajo la supervisión de: DR. MIGUEL A. VELÁSQUEZ VALLE**



Bermejillo, Durango, mayo de 2020

# Definición de la línea base de degradación de la tierra en México a escala sub-nacional

Tesis realizada por la **C. Georgina Pérez Rodríguez** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

DIRECTOR:   
\_\_\_\_\_

**Dr. Miguel A. Velásquez Valle**

CO-DIRECTOR:   
\_\_\_\_\_

**Dr. Armando López Santos**

ASESOR:   
\_\_\_\_\_

**Dr. José Villanueva Díaz**

ASESOR:   
\_\_\_\_\_

**M. C. Jorge Luis García Rodríguez**

# CONTENIDO

LISTA DE CUADROS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
DEDICATORIA .....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS .....	x
RESUMEN GENERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT .....	xii
1. Introducción .....	1
1.1. Importancia.....	2
1.2. Justificación .....	3
1.3. Antecedentes.....	3
2. Objetivo general .....	5
2.1. Objetivos específicos.....	5
2.2. Hipótesis.....	5
3. Revisión de literatura .....	6
3.1. Tierra .....	6
3.2. Degradación de la tierra (DT) .....	7
3.3. Neutralidad de la Degradación de la Tierra (NDT) .....	9
3.3.1. Productividad de la tierra .....	13
3.3.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	13
3.3.2. Reservas de carbono (COS).....	14
3.3.2.1. Programa Soil and Environment (S&E).....	16
3.3.3. Cubierta terrestre .....	16
3.4. Sistemas de Información Geográfica, Percepción remota y Sensores remotos	17
3.4.1. Imágenes de satélite .....	18
3.4.2. Clasificación supervisada.....	19
3.5. Estaciones meteorológicas.....	20
3.6. Sequía .....	21
3.6.1. Índice normalizado de precipitación (SPI).....	21
3.7. Aridez .....	23
3.7.1. Índice de aridez.....	24

3.8.	Suelos .....	25
3.9.	Erosión eólica e hídrica .....	26
3.10.	Cuencas .....	27
4.	Materiales y métodos .....	29
4.1.	Ubicación y descripción del área de estudio.....	29
4.2.	Insumos cartográficos y programas utilizados.....	30
4.3.	Metodología.....	31
4.3.1.	Análisis climatológico e índice normalizado de precipitación (SPI).....	31
4.3.2.	Índice de aridez Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963) .....	34
4.3.3.	Índice de aridez De Martonne (1926).....	35
4.3.4.	Erosión hídrica y eólica laminar .....	36
4.3.4.1.	Insumo principal (PMA) y áreas de influencia erosiva.....	37
4.3.4.2.	Evaluación de la erosión hídrica laminar.....	37
4.3.4.3.	Clasificación de la erosión hídrica laminar .....	38
4.3.4.4.	Evaluación de la erosión eólica laminar.....	39
4.3.4.5.	Clasificación de la erosión eólica laminar.....	40
4.3.5.	Cambios en la Cubierta Vegetal .....	41
4.3.6.	Productividad Primaria Neta (NDVI) .....	43
4.3.7.	Reservas de Carbono Orgánico en el Suelo (COS).....	44
4.3.8.	Fase de campo .....	45
5.	Resultados y Discusión.....	48
5.1.	Análisis climatológico e índice normalizado de precipitación (SPI) .....	48
5.2.	Índices de aridez .....	55
5.2.1.	Precipitación media anual .....	55
5.2.2.	Índice de aridez Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963) .....	56
5.2.3.	Índice de aridez De Martonne (1926).....	60
5.3.	Erosión hídrica y eólica laminar.....	63
5.3.1.	Índices.....	63
5.3.2.	Calificadores para erosión hídrica laminar .....	64
5.3.3.	Erosión hídrica laminar .....	68
5.3.4.	Erosión eólica laminar.....	70
5.4.	Cambios en la Cubierta Vegetal .....	73

5.5. Productividad primaria neta (PPN) .....	77
5.5.1. Clasificación supervisada.....	77
5.5.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	82
5.5.3. Fase de campo .....	87
5.6. Reservas de Carbono Orgánico en el Suelo (COS) .....	90
5.7. Línea Base de Degradación Nacional (LBDN 2013) .....	96
6. Conclusiones .....	99
6.1. Conclusión general.....	99
6.2. Conclusiones específicas .....	99
7. Literatura citada .....	101

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación del índice estandarizado de precipitación (SPI).....	22
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas analizadas. ....	31
Cuadro 3. Clasificación del índice de Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963). .....	35
Cuadro 4. Zonificación climática según el índice De Martonne (1926).....	35
Cuadro 5. Clasificación de la erosión hídrica laminar.....	39
Cuadro 6. Clasificación para CATEX (suelos calcáreos).....	39
Cuadro 7. Clasificación para CATEX (suelos no calcáreos).....	40
Cuadro 8. Clasificación para CAUSO.....	40
Cuadro 9. Clasificación de la erosión eólica laminar. ....	41
Cuadro 10. Homologación de los grupos de vegetación. ....	42
Cuadro 11. Estadísticos descriptivos de las estaciones analizadas. ....	51
Cuadro 12. SPI por década para la subcuenca. ....	55
Cuadro 13. Clasificación del índice de aridez.....	59
Cuadro 14. Clasificación del índice de aridez De Martonne en la subcuenca. ....	62
Cuadro 15. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAERO.....	65
Cuadro 16. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATEX. ....	65
Cuadro 17. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATOP. ....	66
Cuadro 18. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAUSO.....	67
Cuadro 19. Erosión hídrica laminar en la subcuenca. ....	68
Cuadro 20. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATEX. ....	70
Cuadro 21. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAUSO.....	70
Cuadro 22. Erosión eólica laminar en la subcuenca.....	72
Cuadro 23. Clasificación de las series de USV. ....	73
Cuadro 24. Matriz de transición para las series de USV II y VI (1993 – 2014).....	76
Cuadro 25. Clasificación supervisada para la época seca (1990 – 2018).....	78
Cuadro 26. Clasificación supervisada para la época húmeda (2001 – 2018).....	79
Cuadro 27. NDVI para la época seca. ....	82
Cuadro 28. NDVI para la época húmeda.....	82
Cuadro 29. Carbono orgánico en el suelo en la subcuenca RMA. ....	90
Cuadro 30. Comparación entre interpoladores para el COS. ....	91
Cuadro 31. Comparación entre potencias de interpoladores.....	92
Cuadro 32. COS para sitios de muestreo. ....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Ubicación geográfica de la subcuenca Río Medio Aguanaval.....	29
Figura. 2. Distribución de las estaciones meteorológicas analizadas.....	33
Figura. 3. Esquema para definir áreas de influencia de erosión laminar en la SRMA. ..	36
Figura. 4. Plantilla utilizada en el programa S&E.....	45
Figura. 5. Distribución de los sitios de muestreo. ....	47
Figura. 6. Precipitación por año derivada de diversas estaciones climáticas distribuidas en la SRMA. ....	48
Figura. 7. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima para Coahuila de 1970 a 2018.....	49
Figura. 8. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima en Durango de 1970 a 2018.....	50
Figura. 9. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima en Zacatecas de 1970 a 2018.....	50
Figura. 10. Índice estandarizado de precipitación (SPI) medio para la subcuenca. ....	53
Figura. 11. Interpolación del SPI medio para la subcuenca RMA.....	54
Figura. 12. Distribución de la precipitación en la subcuenca. ....	56
Figura. 13. Temperatura del mes más frío.....	57
Figura. 14. Temperatura del mes más caliente. ....	58
Figura. 15. Delimitación de categorías según el índice de aridez.....	59
Figura. 16. Distribución del índice De Martonne en la subcuenca. ....	61
Figura. 17. Mapa nacional del índice de aridez De Martonne (Díaz-Padilla <i>et al.</i> , 2011). ....	62
Figura. 18. Distribución del PECRE en la subcuenca.....	63
Figura. 19. Distribución del IALLU (a) y del IAVIE (b) en la subcuenca.....	64
Figura. 20. Resultado de los calificadores CAERO (a) y CATEX (b) de la metodología SEDESOL-INE. ....	66
Figura. 21. Resultado de los calificadores CATOP (a) y CAUSO (b) de la metodología SEDESOL-INE. ....	67
Figura. 22. Distribución de la erosión hídrica laminar en la SRMA. ....	69
Figura. 23. Resultado de los calificadores CATEX (a) y CAUSO (b) de la metodología SEDESOL-INE. ....	71
Figura. 24. Distribución de la erosión eólica laminar en la SRMA. ....	72
Figura. 25. Cambios en la cubierta vegetal en el periodo (1993 – 2014). ....	75
Figura. 26. Cambios generales entre Serie II y Serie VI de USV. ....	77
Figura. 27. Clasificación supervisada para la época seca (1990 – 2018).....	80

Figura. 28. Clasificación supervisada para la época húmeda (2001 – 2018). .....	81
Figura. 29. NDVI para la época seca.....	83
Figura. 30. Diferencia de NDVI de época seca (2018-2010) y (2010-1990).....	84
Figura. 31. NDVI para la época húmeda. ....	85
Figura. 32. Diferencia de NDVI de época húmeda (2018-2010) y (2010-2001).....	86
Figura. 33. Contenido de carbono orgánico en la SRMA mediante el interpolador Kriging. .....	93
Figura. 34. Contenido de carbono orgánico en la capa superficial (0 a 20 cm) en los suelos de México. ....	94
Figura. 35. Contenido de carbono orgánico según la FAO 2017.....	95
Figura. 36. Línea base de degradación nacional (2013) para la SRMA. ....	97
Figura. 37. Línea base de degradación de la subcuenca. ....	98



## DEDICATORIA

### *A mis padres*

*Por apoyarme en cada una de las etapas de mi vida, por todos los consejos y regaños, además de su paciencia. Siempre han sido mis pilares, en los buenos y no tan buenos momentos. Les agradezco por todo su amor y comprensión. Sé que cada uno de mis pequeños logros son suyos también. Mi amor y agradecimiento eterno para ustedes. Los amo.*

### *A mi hermosa familia*

*Con especial dedicación y agradecimiento.*

## **AGRADECIMIENTOS**

### **CONACYT**

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, agradezco la beca recibida durante la maestría.*

### **Chapingo-URUZA**

*A la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, al Posgrado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, a cada uno de los profesores que compartieron sus conocimientos y consejos, así como todo el personal que de una u otra forma colaboró para que la maestría se lleve a cabo.*

### **Comité asesor**

*Dr. Miguel A. Velásquez Valle*

*Le agradezco el apoyo y disponibilidad para que esta investigación se lleve a cabo. Por su asistencia en cada uno de los seminarios y sus sugerencias.*

*Dr. Armando López Santos*

*Expreso mi agradecimiento por su instrucción, apoyo y colaboración durante el desarrollo de esta investigación, también por el tiempo y la dedicación que puso en la realización y revisión de este documento para obtener el mejor resultado posible. Gracias Dr. Armando.*

*Dr. José Villanueva Díaz*

*Le agradezco las múltiples sugerencias y consideraciones, así como su pronta respuesta a cada una de mis dudas. Además de su tiempo invertido en la corrección de este documento.*

*M. C. Jorge Luis García Rodríguez*

*Gracias.*

## DATOS BIOGRÁFICOS



### Datos personales

Nombre	<b>Georgina Pérez Rodríguez</b>
Fecha de nacimiento	<b>30 de abril de 1991</b>
Lugar de nacimiento	<b>Santa Clara, Durango</b>
CURP	<b>PERG910430MDGRDR04</b>
Profesión	<b>Ingeniero Forestal</b>
Cédula profesional	<b>9848857</b>

### Desarrollo académico

Bachillerato	<b>Centro de Bachillerato Tecnológico Forestal No. 1, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango</b>
Licenciatura	<b>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango</b>
Maestría	<b>Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Bermejillo, Durango.</b>

## RESUMEN GENERAL

### Definición de la línea base de degradación de la tierra en México a escala sub-nacional <sup>1</sup>

La tierra es el sistema bio-productivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otras biotas y los procesos ecológicos e hidrológicos que tienen lugar dentro del sistema. La tierra degradada se define como el estado que resulta de la disminución o pérdida persistente de la biodiversidad y las funciones y servicios del ecosistema que no pueden recuperarse completamente sin ayuda. Los procesos de degradación incluyen erosión hídrica y eólica, salinización, sodicidad, sellado, compactación, pérdida de materia orgánica y pérdida permanente de cobertura vegetal. La Neutralidad de la Degradación de la Tierra (NDT), es el estado donde la cantidad y calidad de los recursos necesarios para apoyar las funciones y servicios del ecosistema y mejorar la seguridad alimentaria, permanecen estables o aumentan. Para determinar la gravedad de la degradación de la tierra, así como la implementación de la NDT, se requiere de la evaluación de las tierras, mediante el conocimiento de la geología, el suelo, la fisiografía, el clima, la vegetación y el uso de la tierra. Una forma útil de conocer estas características es el establecimiento de una línea base, que se refiere a las condiciones ambientales actuales de los ecosistemas, para la comparación del estado actual y del estado futuro. El objetivo principal del estudio fue establecer una línea base de degradación para el monitoreo futuro para la subcuenca Río Medio Aguanaval, considerando la condición de aridez, pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica laminar, cambios en la cubierta vegetal, productividad primaria neta y las reservas de carbono orgánico en el suelo. Considerando cada uno de los indicadores involucrados se determinó que el nivel de degradación que prevalece en la subcuenca es moderado, en contraste con la Línea Base de Degradación Nacional elaborada por la Conafor en 2013, donde el nivel de degradación que domina es el severo.

**Palabras clave:** Tierra, degradación, línea base, indicadores

---

<sup>1</sup> Resume de la **Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas**, Posgrado Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo  
**Autor:** Georgina Pérez Rodríguez  
**Director de Tesis:** Dr. Miguel A. Velásquez Valle

## GENERAL ABSTRACT

### Definition of the land degradation baseline in Mexico at the sub-national level

Land is the terrestrial bio-productive system that comprises the soil, vegetation, other biota, and the ecological and hydrological processes that take place within the system itself. Degraded land is defined as the state that results from the persistent decline or loss of biodiversity and ecosystem functioning, and services that cannot be fully recovered without assistance. Degradation processes involve water and wind erosion, salinization, sodicity, sealing, compaction, loss of organic matter, and permanent loss of vegetation cover. Land Degradation Neutrality (LDN) is the state where the quantity and quality of resources necessary to support ecosystem functions and services, and improve food security remain stable or increase along time. To determine the severity of land degradation, as well as the implementation of the LDN, the evaluation of the land is required, being important to have the knowledge of the geology, soil, physiography, climate, vegetation and land use. A useful way to determine those features is to establish a baseline, which refers to the current environmental conditions of ecosystems, in order to compare the current state to the future state. The main objective of the study was to establish a degradation baseline for future monitoring for the Río Medio Aguanaval sub-basin, considering the aridity condition, loss of soil due to water erosion and laminar wind, changes in vegetation cover, net primary productivity, and organic carbon reserves in the soil. Considering each of the indicators involved, it was determined that the level of degradation that prevails in the sub-basin is moderate, in contrast to the National Degradation Baseline developed by Conafor in 2013, where the reported dominant degradation level was ranked as severe.

**Key words:** Land, degradation, baseline, indicators

## 1. Introducción

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), (2017), delimita la tierra como el sistema bio-productivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otras biotas y los procesos ecológicos e hidrológicos que tienen lugar dentro del sistema.

La tierra degradada se define como el estado de la tierra que resulta de la disminución o pérdida persistente de la biodiversidad y las funciones y servicios del ecosistema que no pueden recuperarse completamente sin ayuda, dentro de las escalas de tiempo (IPBES, 2018). Cifras recientes, definen que el 25 % de la superficie terrestre está muy degradada (UNCCD, 2015). Los procesos de degradación incluyen, entre otros, erosión hídrica y eólica, salinización, sodicidad, sellado, compactación, pérdida de materia orgánica y pérdida permanente de cobertura vegetal (Serrato-Sánchez *et al.*, 2002, citados por Moreno-Reséndez, Reyes-Carrillo y Márquez-Quiroz, 2015). Las amenazas más significativas para la función del suelo a escala global son la erosión del suelo (pérdida media mundial de 0,3 % del rendimiento anual de los cultivos), la pérdida del carbono orgánico en el suelo (reducción en un promedio del 52 % en las regiones templadas, 41 % en las regiones tropicales, y 31 % en las regiones boreales) y el desequilibrio de nutrientes (FAO y GTIS, 2015).

El alcance y gravedad de la degradación de la tierra (DT) combinado con los efectos negativos del cambio climático requieren de políticas y programas para detener y revertir la DT. El concepto de Neutralidad de la Degradación de la Tierra (NDT), se define como un estado donde la cantidad y calidad de los recursos de la tierra, necesarios para apoyar las funciones y servicios del ecosistema y mejorar la seguridad alimentaria, permanecen estables o aumentan dentro de escalas y ecosistemas temporales y espaciales específicos (UNCCD, 2016).

Para determinar la gravedad de la DT así como la implementación de la NDT, se requiere de la evaluación de las tierras, mediante el conocimiento de la geología, el suelo, la fisiografía, el clima, la vegetación y el uso de la tierra (FAO, 1976; Andrade *et al.*, 2010). Una forma útil de conocer estas características es el establecimiento de una línea base, que se refiere a las condiciones ambientales actuales de los ecosistemas y recursos naturales existentes en el área, que permita la comparación del estado actual y del estado

futuro, que genere datos sobre la degradación y las condiciones de los recursos para identificar el efecto de las acciones empleadas.

La Comisión Nacional Forestal presentó la primera línea base de degradación nacional, la cual tuvo como objetivo principal determinar las condiciones actuales de la degradación y la desertificación en México, la cual señala que el 90.7 % de la superficie nacional presenta algún grado de degradación, siendo el grado severo y extremo, con 47.8 %, el de mayor presencia en el país (CONAFOR-UACH, 2013).

Para esta caracterización se requiere del uso de sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos o teledetección, que juegan un rol importante en el análisis de los recursos naturales. Los SIG son un conjunto de herramientas para la colección, almacenamiento, recuperación, transformación, análisis y representación de datos espaciales (Burrough, 1986, citado por González y Sosa, 2003), facilitan información crítica para el estudio de los recursos naturales (Chuvieco, 1990, citado por González y Sosa, 2003). El uso de varias herramientas para alcanzar una gestión sostenible de la tierra generará grandes beneficios e información muy valiosa. Por esto, el objetivo es generar la línea base de la degradación de la subcuenca Río Medio Aguanaval, ya que se considera que la línea base de degradación nacional (CONAFOR-UACH, 2013) subestima la condición que guarda la escala sub-nacional.

### **1.1. Importancia**

Se ha hecho hincapié en la importancia de la generación coordinada de datos mundiales sobre degradación de recursos naturales. Las Naciones Unidas en la Agenda 2030, reconocen la necesidad de nuevas fuentes de información, explotando observaciones geoespaciales que pueden desbloquear la riqueza de información sobre el espacio y el tiempo (UN, 2016).

La UNCCD (2016), desarrolló el concepto Neutralidad de la Degradación de la Tierra "(NDT)", para fomentar la implementación de una combinación óptima de medidas, con el fin de lograr un estado sin pérdida neta de tierras sanas y productivas. En México la implementación de la NDT constituye una opción de prevención y remediación de áreas degradadas, que provea de información útil para determinar acciones pertinentes.

## **1.2. Justificación**

La degradación de las tierras se ha clasificado como un importante problema ambiental y social. Por lo tanto, la observación y la detección temprana es un objetivo primordial, siendo los métodos de teledetección una opción viable para el desarrollo de sistemas de monitoreo (UNCCD, 2016).

Una cuenca se considera como una unidad de planeación de manejo sustentable, por la interrelación entre los diferentes recursos naturales y las actividades humanas, así como todos los procesos inherentes al área, como por ejemplo el proceso de degradación. En la subcuenca Río Medio Aguanaval, área de interés de este estudio, el 55 % de su superficie corresponde a matorrales y casi 24 % a zonas agrícolas, considerando agricultura de temporal y de riego, principalmente en la zona suroeste donde la producción de maíz, frijol, avena y sorgo, es el principal sustento de la población.

El conocimiento del grado de degradación de la subcuenca Río Medio Aguanaval permitirá determinar la implementación de acciones encaminadas a revertir, recuperar y prevenir la degradación, ya que dicha área no cuenta con información sobre el estado actual de los recursos existentes.

## **1.3. Antecedentes**

La Comisión Nacional Forestal en 2013, en cumplimiento de los compromisos adquiridos a nivel nacional e internacional en materia de Lucha contra la Desertificación, tanto con el Programa de Acción para Combatir la Desertificación en México, como con el Sistema Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (SINADES) y con la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), realizó el primer estudio nacional, que integra los indicadores de la degradación de las tierras y la desertificación, conforme a los estándares nacionales e internacionales legalmente aceptados. La línea base nacional tuvo como principal objetivo determinar las condiciones actuales de la degradación de tierras y la desertificación en México. Se realizó a partir del análisis de variables agrupadas en seis componentes sobre degradación de tierras provenientes de informes generados por instituciones oficiales. En total se generaron 17 indicadores, de estos, 12 indicadores correspondieron al medio biofísico, cuatro del medio socioeconómico, y uno más que



integró a todos los anteriores. A partir del análisis, derivado de la integración del indicador de la degradación de tierras, se señala que alrededor de 90.7 % de la superficie nacional (1. 7 millones de hectáreas), presenta algún grado de degradación. Las clases de degradación ligera y moderada constituyen 41.5 % y la degradación severa y extrema, representa 47.8 %, lo que indica, que el problema asociado a la disminución o pérdida de la capacidad productiva de las tierras del país es grave, ya que cerca de la mitad del país tiene problemas de severos a extremos de degradación de tierras, por lo que es imperativo establecer planes y acciones encaminadas a revertir este proceso (CONAFOR-UACH, 2013).

El objetivo 15 del marco del Desarrollo Sostenible propone el gestionar de forma sostenible los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad hacia el 2030 (UNCCD, 2016).

En una línea base se evalúan las condiciones ambientales (físicas y biológicas) del área de estudio previas a la realización de alguna actividad, la línea base permite establecer la situación inicial de un escenario y sirve como un punto de comparación, para que en futuras evaluaciones se pueda determinar cambios y caracterizar en forma más precisa la condición actual.

## **2. Objetivo general**

Establecer una línea base de la degradación de los recursos naturales para el monitoreo futuro, ante la posible implementación de prácticas de adaptación y mitigación para evitar la degradación de la tierra en la subcuenca Río Medio Aguanaval (SRMA).

### **2.1. Objetivos específicos**

- Evaluar la relación existente entre la condición de aridez y la pérdida de suelo en la SRMA.
- Estimar los cambios en la distribución de la cobertura vegetal asociados a la variabilidad climática para la SRMA.
- Evaluar las reservas de carbono orgánico en la subcuenca como indicador del grado de degradación de la tierra.
- Integrar los indicadores a evaluar para determinar el nivel de degradación de la subcuenca.

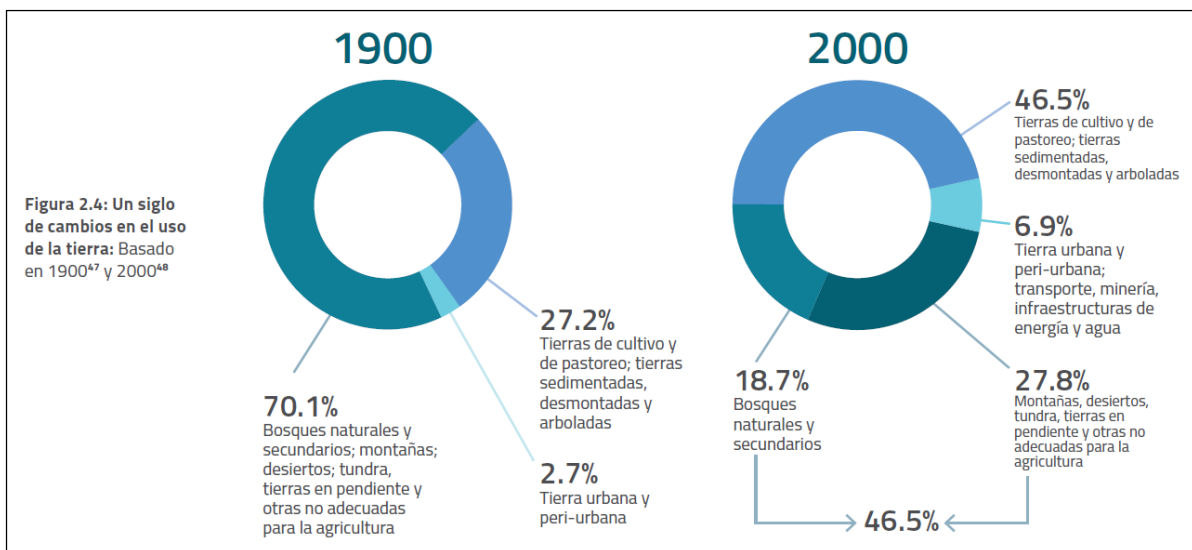
### **2.2. Hipótesis**

- La línea base nacional de la degradación (CONAFOR, 2013) subestima el nivel de degradación presente en la subcuenca Río Medio Aguanaval.
- Los indicadores utilizados para evaluar el nivel de degradación en la subcuenca aportan una buena descripción de la degradación en la unidad de estudio.

### 3. Revisión de literatura

#### 3.1. Tierra

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), (2017), delimita la tierra como «el sistema bio-productivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otras biotas y los procesos ecológicos e hidrológicos que tienen lugar dentro del sistema». De forma alterna, la tierra se define como «un área de la superficie terrestre, que comprende todos los atributos de la biosfera inmediatamente por encima o por debajo de esa superficie, incluyendo los del clima cercano a la superficie, las formas del suelo y del terreno, la hidrología superficial (incluyendo lagos poco profundos, ríos, pantanos y ciénagas) y las reservas de agua subterránea asociadas a ellas, las poblaciones de plantas y animales (biodiversidad), los patrones de asentamiento humano y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente. Sea la tierra un bien privado o público, posee el potencial de proporcionar un conjunto completo de bienes y servicios: mitigar el cambio climático a escala mundial, regular el suministro de agua a gran escala y apoyar la producción de alimentos a escala local. El tamaño, el ritmo y la naturaleza de la urbanización han constituido características definitorias de los siglos XX y XXI. Además, las rápidas tasas de crecimiento de la población urbana durante el siglo pasado se han producido en menos del 3 % de la superficie terrestre del mundo, su impacto ha sido mundial.



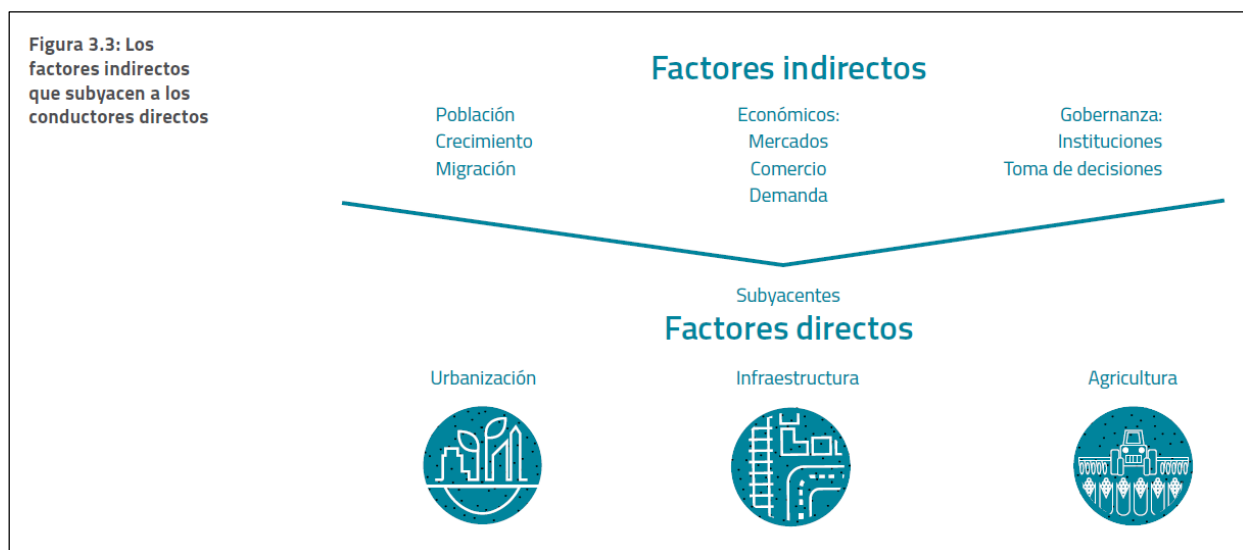
Fuente: Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD), (2017).

### 3.2. Degradación de la tierra (DT)

La degradación de la tierra es un fenómeno complejo, que suele comprender la pérdida de algunos o todos los factores siguientes: productividad, suelo, cobertura vegetal, biomasa, biodiversidad, servicios ecosistémicos y resiliencia ambiental. La degradación es comúnmente originada por la mala administración o la sobreexplotación de los recursos de la tierra (CNULD, 2017).

La tierra degradada se define como el estado de la tierra que deriva de la disminución o pérdida persistente de la biodiversidad y las funciones y servicios del ecosistema que no pueden recuperarse completamente sin ayuda, dentro de las escalas de tiempo (IPBES, 2018).

Los factores que condicionan la degradación de la tierra pueden agruparse en dos tipos: (i) conductores directos y (ii) conductores indirectos. Los conductores directos son naturales o son inducidos por actividades humanas que se relacionan directamente con los cambios en el uso y condición de la tierra. Los conductores indirectos son más difíciles de detectar o de cuantificar, y la determinación de su influencia estriba predominantemente de indicadores económicos y sociales, así como del análisis de tendencias (CNULD, 2017).



Fuente: Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD), (2017).

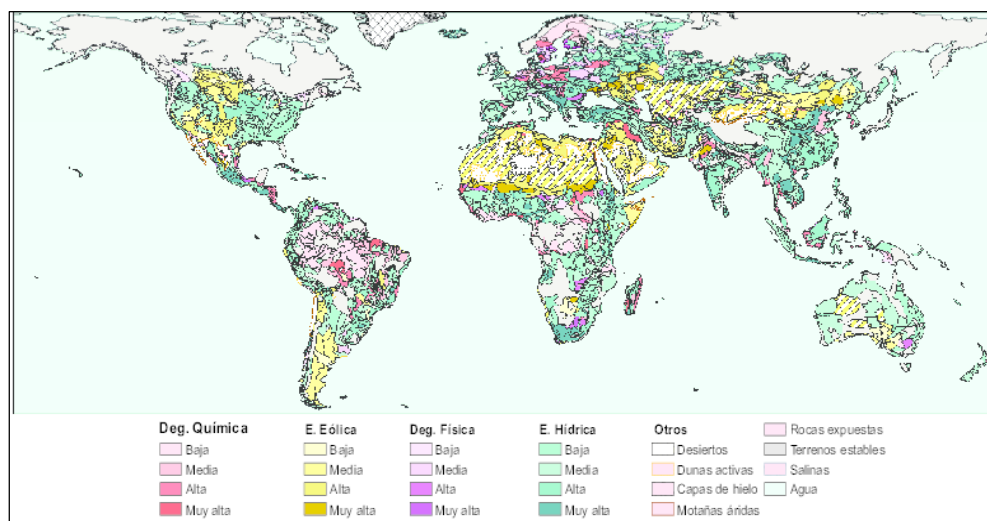
La DT es un problema ambiental que va en aumento y que cada vez afecta a más personas alrededor del mundo. Se calcula que cerca del 20 % de la superficie terrestre,

excluyendo las zonas hiperáridas, presenta procesos de degradación de la tierra (Oldeman *et al.*, 1991, citado por Emanuelli *et al.*, 2016). La DT tiene un profundo impacto en las sociedades y los recursos naturales en todo el mundo, y es el problema ambiental más desafiante en las tierras secas (MEA, 2005, citado por Easdale, 2016).

La DT un fenómeno global, que a menudo tiene un impacto nocivo inmediato a nivel local. Cerca del 25 % de la superficie global cultivable se considera degradada; aproximadamente 12 millones de hectáreas se suman cada año al área total de tierra degradada. Los costos económicos de la degradación de las tierras se estiman en 490,000 millones de dólares anuales, lo que constituye un seis por ciento del producto interno bruto derivado de la agricultura a nivel mundial (UNCCD, 2016).

La CNUCLD, (2017) reporta que los cálculos globales sobre la cantidad de tierras degradadas varían ampliamente, de 1,000 millones a 6,000 millones de hectáreas, lo que ilustra tanto la magnitud del problema como la necesidad de datos más precisos.

Como se menciona en el informe más reciente de Nkonya *et al.* (2011, citados por López Santos, 2016), sobre la valoración de la degradación global de las tierras (GLADA, por sus siglas en inglés), este problema se estima en alrededor de 1,964 millones de hectáreas, superficie en la que contribuyen en mayor medida (83.6%) los dos tipos de erosión: hídrica y eólica, con el 55.7 y 27.9 %, respectivamente; seguidas con el 15.9 % se encuentran la química y física con 11.8 y 4.02 %, respectivamente. Las zonas que muestran los mayores impactos en este sentido son, por orden de importancia: Asia, 38 %; África, 25.2 %; América Latina, 15.6 %; y Europa, 11.3 %.



Fuente: López Santos, (2016).

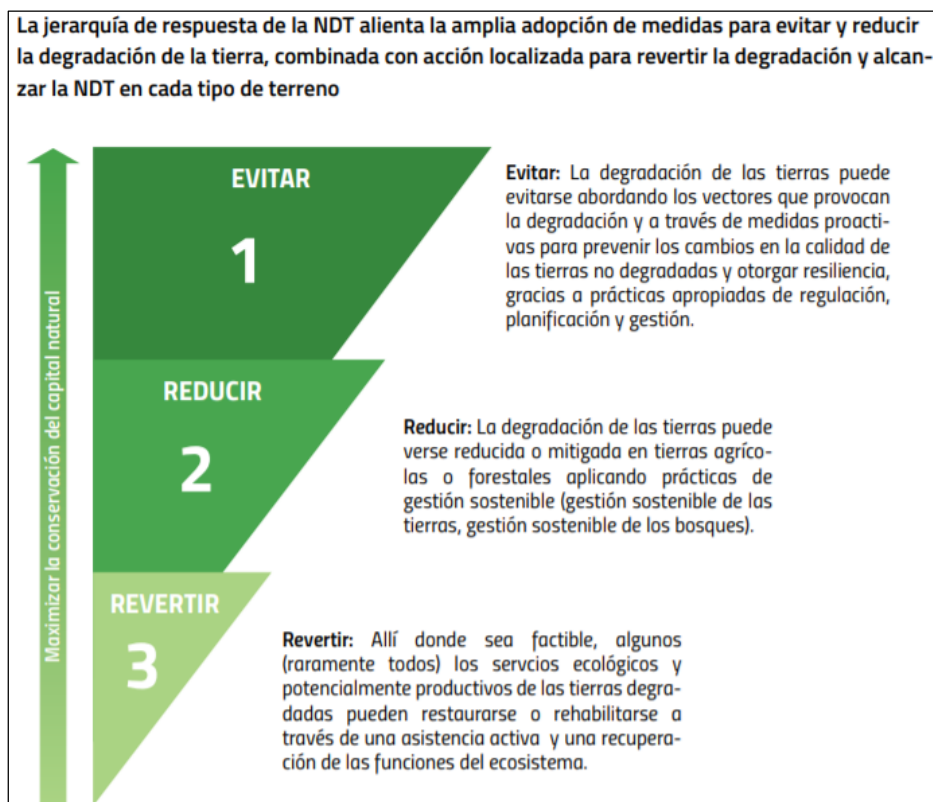
### 3.3. Neutralidad de la Degradación de la Tierra (NDT)

Orr *et al.* (2017), señalan que la CLD define la neutralidad de la degradación de las tierras como “una situación en que tanto la cantidad y la calidad de los recursos de la tierra necesarios para sostener las funciones y los servicios de los ecosistemas e incrementar la seguridad alimentaria se mantienen estables o aumentan en los ecosistemas y las escalas temporales y espaciales de que se trate” (Decisión 3/COP.12, UNCCD, 2015<sup>a</sup>).

Se recomienda el video: Land Degradation Neutrality. Why it matters, how it’s done.

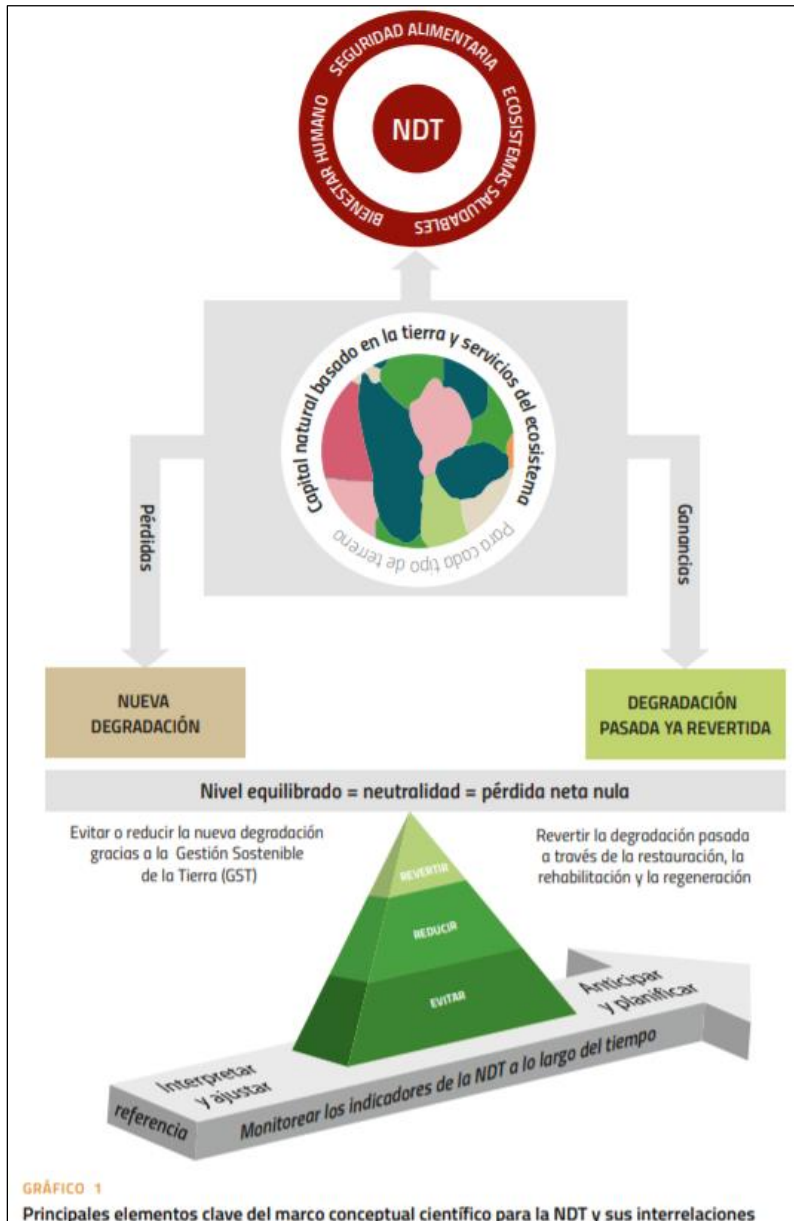
[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=1&v=y7uDAA\\_3VHk&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=1&v=y7uDAA_3VHk&feature=emb_logo)

El objetivo es conservar o aumentar la base del recurso de la tierra (es decir, las reservas de capital natural asociado a los recursos de la tierra y los servicios del ecosistema que emanan de ellos). La NDT se concibió para promover un enfoque dual de medidas que evitaran o redujeran la degradación de las tierras, combinado con medidas para revertir la degradación de tierras ya degradadas, de modo que estas pérdidas fueran contrarrestadas con beneficios y se obtuviera así un estado sin pérdidas netas de tierra fértil y productiva (Orr *et al.*, 2017).



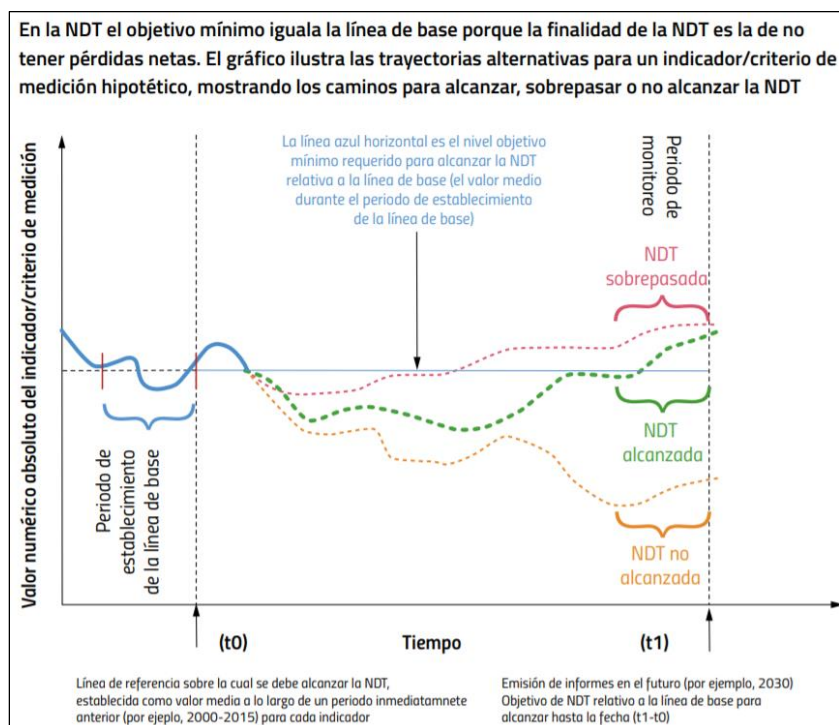
Fuente: Orr *et al.*, (2017).

Las acciones para alcanzar la NDT incluyen enfoques de gestión de la tierra que evitan o reducen la degradación, junto con los esfuerzos encaminados a revertir la degradación a través de la restauración o la rehabilitación de tierra que ha perdido productividad.



Fuente: Orr *et al.*, (2017).

En este sentido, el estado de la NDT se alcanza si el capital natural basado en la tierra se preserva o mejora entre el periodo de referencia ( $t_0$ ) y una fecha futura cuando el proceso es sometido a un seguimiento ( $t_1$ ): ( $t_1 \geq t_0$ ). Entonces, la NDT se consigue si las ganancias en el capital natural basado en la tierra del área objetivo son iguales o mayores a las pérdidas (UNCCD, 2016).



Fuente: Orr *et al.*, (2017).

La NDT se centra en preservar la productividad de los recursos de la tierra, suministrar apoyo a las funciones y servicios de los ecosistemas y, por consiguiente, satisfacer las necesidades de las generaciones actuales y futuras (UNCCD, 2016).

El marco conceptual de la NDT detalla un conjunto mínimo de indicadores para reflejar los procesos clave que sustentan el capital natural terrestre. La selección de indicadores relevantes a nivel mundial para la degradación de la tierra tiene desafíos inherentes debido a la gran variabilidad en los procesos de degradación de la tierra, así como a consideraciones prácticas sobre la capacidad de los países para recopilar, analizar, interpretar y notificar el progreso hacia el logro de NDT (Cowie *et al.*, 2018). Los tres indicadores recomendados para estimar la base de referencia de las metas de la NDT se pueden utilizar de forma conjunta para realizar un seguimiento de la cantidad y calidad del capital natural basado en la tierra y los servicios de ecosistemas que parten de esa base terrestre. La cubierta terrestre brinda un primer indicio de la reducción o aumento de la vegetación, la productividad de la tierra capta los cambios relativamente rápidos, mientras que el carbono orgánico en el suelo (COS) muestra cambios más lentos que sugieren trayectoria y proximidad a umbrales (UNCCD, 2016).





Fuente: Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD), (2017).

El concepto de Degradación Neta Cero de la Tierra (ZNLD, por sus siglas en inglés), expresa que la extensión de las tierras degradadas globales en áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas disminuirá o al menos se mantendrá estable durante los próximos 15 años. Este enfoque se basa en tres premisas clave (Chasek *et al.*, 2015, citado por Easdale, 2016):

- (i) el objetivo de prevenir por completo una mayor degradación es demasiado ambicioso y la atención debería centrarse más bien en reducir su tasa.
- (ii) la tierra global que ya está degradada ha alcanzado una extensión espacial de advertencia de casi el 20 % (MEA, 2005, citado por Easdale, 2016), y
- (iii) la provisión de servicios ecosistémicos (en particular la productividad biológica) de tierras ya degradadas puede recuperarse o restaurarse. Para este fin, hay una serie de desafíos y oportunidades científicas y políticas para la implementación de un protocolo ZNLD en tierras secas en todo el mundo (Gnacadjá, 2015, citado por Easdale, 2016).

### 3.3.1. Productividad de la tierra

El criterio de medición operativo para este indicador se define como el estado de la vegetación en relación a su máximo potencial, estratificado por usos de la tierra con base a sus características naturales o productivas, y cuantificada en base a índices derivados de datos satelitales. Se considera el estado de la vegetación como una expresión conjunta entre el porcentaje de cobertura vegetal, sanidad, vigor y grado de desarrollo en el momento de mayor desarrollo vegetal en el año (Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF), (s/f).

La mejora de la tierra generalmente se reconoce como estrechamente determinada por el aumento de la productividad primaria neta (PPN) de la tierra, bajo ciertas condiciones, y el incremento en la fertilidad del suelo. La tendencia de la PPN, aproximada por la tendencia del índice de vegetación de diferencia normalizada interanual puede ser un indicador indirecto de la degradación o mejora del suelo si la fuente de nutrientes para el crecimiento de la vegetación o cultivo proviene exclusivamente de los suelos (es decir, la productividad de biomasa basada en el suelo) (Nkonya, Mirzabaev & von Braun, 2016).

#### 3.3.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) fue introducido por Rouse y colaboradores (1974) para generar un índice espectral que separa la vegetación verde del suelo empleando datos digitales de LANDSAT. Éste se expresa como la diferencia entre las bandas infrarroja cercana (IRC) y roja normalizada (R) por la suma de esas bandas, es decir:

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

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

IRC: banda infrarroja cercana

R: banda roja

Este es el índice más comúnmente usado, porque retiene la habilidad para minimizar los efectos topográficos y a su vez producir una escala de medida lineal. La escala de medida oscila de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación.

Considerando esto, los valores negativos representan las superficies sin vegetación (Abaurrea Pereda, 2013).

De entre todos los tipos de datos que pueden ser obtenidos por sensores remotos, el más utilizado en la evaluación de la degradación de suelos es el NDVI, como una estimación de la producción de biomasa y el estado del uso de suelo y cobertura vegetal (Comisión Europea, 2013).

El emplear índices de vegetación tiene su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, posee una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0,6 y 0,7  $\mu\text{m}$ ), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,1  $\mu\text{m}$ ), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa (Merg *et al.*, 2011).

- El agua tiene reflectancia  $R > IRC$ , por lo tanto, valores negativos de NDVI.
- Las nubes presentan valores similares de  $R$  y  $IRC$ , por lo que su NDVI es cercano a 0.
- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

### **3.3.2. Reservas de carbono (COS)**

El carbono orgánico del suelo (COS) es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos (FAO and ITPS, 2018).

El criterio de medición operativo para este indicador se define como la variación de COS hasta los 30 cm de profundidad medido en toneladas de carbono (Ton C), producto de un cambio de uso asociado a degradación de la tierra, que considera su cambio efectivo a 20 años (Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF), (s/f)).

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del C, ocupando un 69,8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001, citado por Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008).

Como parte de las funciones naturales y los servicios ecosistémicos proporcionados por los suelos, un suelo sano acumula más carbono que el almacenado en la atmósfera y la vegetación combinados (Ciais *et al.*, 2013, citados por Towhid, 2013).

El suelo tiene una reserva de carbono tres veces mayor que la de la atmósfera. Por lo tanto, el carbono orgánico del suelo puede desempeñar un papel importante en la mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero. El secuestro de carbono en el suelo, involucra mejorar la concentración y las reservas de carbono, a través de la conversión del uso de la tierra y la adopción de prácticas recomendadas de manejo en ecosistemas agrícolas, pastorales y forestales y la restauración de suelos degradados y perturbados drásticamente (Lal, 2006, citado por Towhid, 2013).

El secuestro de carbono en el suelo es el proceso de transferir dióxido de carbono de la atmósfera al suelo a través de residuos de cultivos y otros sólidos orgánicos, y en una forma que no se reemite de inmediato, esto representa el almacenamiento a largo plazo de carbono en el suelo. El secuestro de carbono en el suelo puede ser una opción efectiva para mitigar la emisión de CO<sub>2</sub> que se combina con la conservación del medio ambiente y la mejora de la fertilidad del suelo (Smith *et al.*, 2007, citado por Towhid, 2013). A nivel mundial, el suelo almacena aproximadamente 1,500 Pg de carbono orgánico y 900 a 1,700 Pg adicionales de carbono inorgánico en la superficie de un metro de suelo (Eswaran *et al.*, 1993, citado por Towhid, 2013).

El COS es el principal elemento que forma parte de la materia orgánica del suelo (MOS), por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro. Al respecto, es importante señalar que los métodos analíticos determinan COS, (calcinación húmeda o seca) y que la MOS se estima a partir del COS multiplicado por factores empíricos como el de van Benmelen equivalente 1,724 (Jackson, 1964, citado por Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008).

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo (Rosell, 1999, citado por

Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Aguilera, 2000, citado por Martínez, Fuentes y Acevedo, 2008). La mayoría de los suelos minerales contienen menos del 5 % en peso de materia orgánica del suelo (MOS), pero esta pequeña cantidad de MOS, posee una importancia biológica enorme, ya que proporciona alimento para microorganismos, retiene agua, actúa como mantillo, almacena nutrimentos, funciona como un acondicionador de suelo y agente de agregación, además hace que el suelo sea friable y fértil. La materia orgánica del suelo contribuye significativamente al secuestro de carbono (Towhid, 2013).

#### **3.3.2.1. Programa Soil and Environment (S&E)**

El programa Soil and Environment (S&E), es una herramienta que, de acuerdo con Bautista, Gallegos y Pacheco, (2016), nos permite:

- Decidir la selección de los mejores sitios para la construcción de vivienda.
- Identificar los suelos con mayor aptitud para producción de alimentos.
- Reconocer los sitios ideales para la recarga de los acuíferos.
- Identificar los suelos que más almacenan carbono orgánico.
- Valorar los suelos de importancia geológica y arqueológica.

S&E sirve para evaluar las funciones ambientales de los suelos que se ganan por recuperación de suelo o lo que se pierde por su degradación. La información generada con S&E es de fácil comprensión y utilidad en la agricultura, ganadería, salud humana, previsión de riesgos de desastres y en la planeación urbana. Para más información visita la página [www.actswithscience.com](http://www.actswithscience.com).

Con el software es posible exportar información tabular y gráfica, así como los datos de referencia espacial al SIG. La interfaz es amigable para la entrada y salida de datos y la gestión de bases de datos está diseñada para usuarios que no conocen el lenguaje de consulta SQL (Gallegos, Bautista & Dubrovina, 2016).

#### **3.3.3. Cubierta terrestre**

El criterio de medición operativo para este indicador se define como cambios de categoría de uso de la tierra, estratificado de acuerdo a las recomendaciones de IPCC (2006)

(Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF), (s/f).

Las condiciones de la cobertura vegetal de la tierra y su evolución a lo largo del tiempo es una representación generalmente aceptada de la productividad de la tierra y sus dinámicas, que muestra las condiciones ecológicas generales y el impacto del cambio ambiental natural y del predominantemente antropogénico (CNULD, 2017).

El monitoreo de la dinámica de la cubierta forestal, es una práctica que apoya la gestión del territorio, dado que permite conocer las tendencias de deterioro de una zona, o las tasas de transformación de áreas o tipos de vegetación específicos, así como también es posible medir el éxito de los programas de conservación del capital natural, y la reconversión productiva, entre otros (Núñez *et al.*, 2010).

El cambio de uso del suelo y vegetación, o en general el cambio de tipos de cobertura del terreno es, en mayor medida, consecuencia de la interacción de las actividades humanas con el medio natural. Estos cambios indican el impacto de las actividades económicas y el desarrollo de las comunidades humanas sobre el territorio y sus recursos, y permiten identificar problemas relativos a la sustentabilidad de las actividades humanas. La identificación espacial y la cuantificación de los cambios contribuye a la caracterización del territorio (Velásquez *et al.*, 2013) y a la ubicación de áreas de atención prioritarias, así como al establecimiento de políticas correctivas y a la formulación de planes de acción respectivos para el mejor manejo de los recursos (Palacio Prieto *et al.*, 2004).

### **3.4. Sistemas de Información Geográfica, Percepción remota y Sensores remotos**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), surgen en la década de los 1960's, como una herramienta que complementa y enriquece los procesos cartográficos. Un SIG, organiza datos geográficamente referenciados en un entorno visual, y tiene como objetivo, estudiar las relaciones espaciales existentes entre distintas capas de información que se superponen, intersectan o comparten un espacio geográfico. La tendencia moderna en SIG, apunta a una mayor integración con diferentes ramos de la

ciencia y la industria, desde estudios de geomarketing hasta estudios geopolíticos; y en un rango del conocimiento, que va desde la arqueología hasta la zoología (ESRI, 2008). En el ámbito del inventario de los recursos naturales y en la planificación de su uso, la geomática y los SIG, desempeñan un papel importante, al permitir contextualizar en un sistema espacialmente referido, datos ambientales, como pueden ser: presencia de una especie de flora o fauna a nivel nacional, estatal o regional, características estructurales de una comunidad vegetal o incluso la interacción entre ambos (ESRI, 2008).

La percepción remota se basa en la medición de la energía del espectro electromagnético en diferentes regiones. De acuerdo con Weng (2010), la radiación electromagnética es una forma de energía con propiedades de onda, cuya principal fuente emisora es el sol y que viaja a la velocidad de la luz. A su vez, las ondas electromagnéticas, se propagan en el espacio en ondas cuya principal característica es su amplitud y frecuencia. El espectro electromagnético, es un mapeo de las características físicas de las ondas electromagnéticas, clasificadas según su amplitud. Una de las características principales de las ondas electromagnéticas es la reflectancia, la cual se centra en el principio de que, cuando una onda electromagnética choca con un cuerpo sólido, parte de la energía contenida se absorbe y parte se refleja. El principio de reflectancia es en el que se basa la percepción remota. Cabe mencionar que los sensores de percepción remota pueden detectar y almacenar tanto la energía reflejada como la emitida por diferentes superficies.

La geomática es un conjunto de ciencias y tecnologías que permiten la adquisición, almacenamiento, análisis y difusión de datos y que, con base en ellos, se genera y sistematiza información geoespacial útil para la administración y manejo de cualquier recurso que tenga una representación territorial (Weng, 2010).

#### **3.4.1. Imágenes de satélite**

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 m para las bandas de 1 a 7 y 9. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 m, además dos bandas térmicas 10 y 11, que son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 m de resolución. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste (106 km x 114 km). El satélite Landsat 8 incorpora dos

instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM+, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, esto debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad, se incluye con cada producto de datos generado, con esto se proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve. Por otra parte, el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Ariza, 2013).

### **3.4.2. Clasificación supervisada**

Uno de los procesos más importantes en la percepción remota consiste en la elaboración de mapas temáticos, donde las coberturas del terreno se clasifican y agrupan en categorías de ocupación y uso del suelo (Sanderson, 2007).

La clasificación se limita a agrupar conjuntos de objetos en clases a través del uso de técnicas de inteligencia artificial o estadísticas, primordialmente en aquella del tipo digital (Arango, Branch y Botero, 2006). Está basado en la disponibilidad de áreas de entrenamiento, que son áreas de las que se conoce a priori, la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una firma espectral característica de cada una de las clases (Sanderson, 2007).

Las áreas de entrenamiento deben ser lo más homogéneas posibles, y en las que se conozca lo que había el día que se tomó la imagen. Las clasificaciones pueden ser amplias, como zonas urbanas, boscosas, de campo abierto y cobertura de cuerpos de agua; o pueden ser muy específicas, por ejemplo, diferenciando tipos de cultivos como campos de maíz, trigo o pastizales. Normalmente, los distintos tipos de terreno se codifican por colores. Finalmente, cada clase o tema obtenido de la clasificación, puede mapearse empleando Sistemas de Información Geográfica generando mapas temáticos (Sanderson, 2007).

El método estadístico de clasificación de imágenes satelitales de Máxima Verosimilitud (MaxLike), utiliza firmas espectrales generadas previamente; por lo que se considera, un sistema de clasificación supervisada. El algoritmo de máxima verosimilitud se alimenta de puntos de control (muestreos de campo), que considera como parámetros.

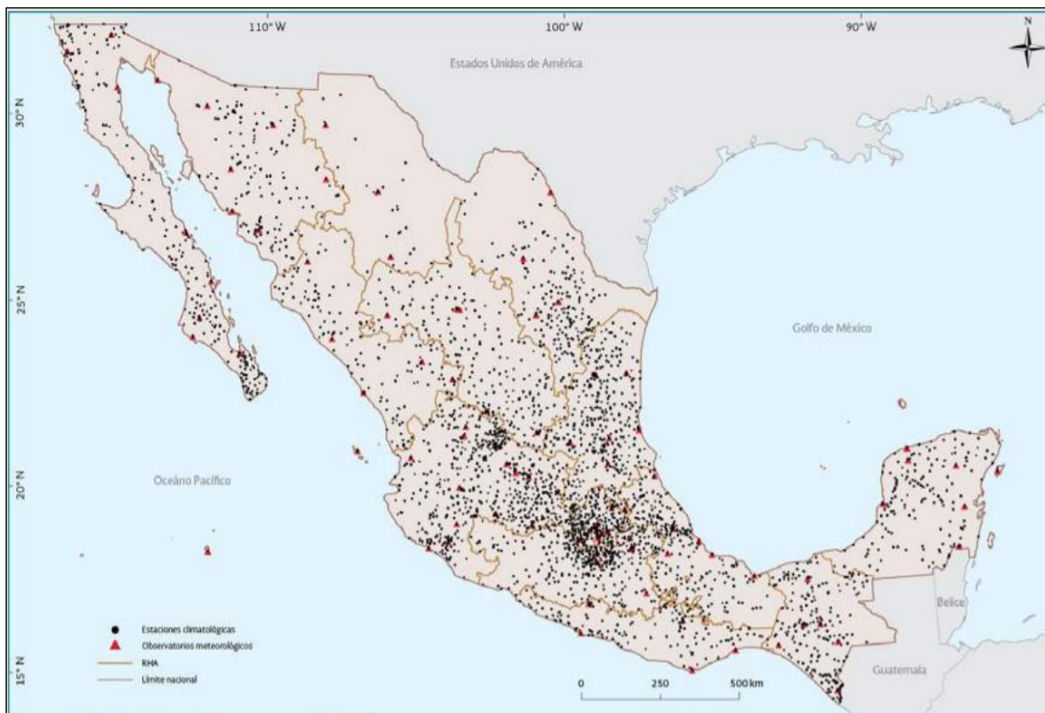


Posteriormente, elige los valores de un conjunto finito de datos (en este caso una imagen satelital), con mayor probabilidad de acercarse a algún parámetro definido previamente, para después ser agrupado en *clusters*, bajo un mismo valor reclasificado en temas o clases; es decir, los parámetros que maximizan la función de verosimilitud (Andersen, 1980). El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Sin embargo, es el más utilizado, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

Ahmad & Quegan (2012), describen el método de máxima verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés), derivado del teorema de Bayes.

### 3.5. Estaciones meteorológicas

En México existen aproximadamente 1,900 estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional, la Comisión Nacional del Agua y la Comisión Federal de Electricidad. Estas estaciones no se encuentran distribuidas de la mejor manera posible, pues hay grandes áreas sin la presencia de alguna estación, ni las observaciones se han distinguido en muchas de ellas por su continuidad y calidad; representan, no obstante, una cantidad aceptable para tratar, con los datos correspondientes, de delimitar los climas de México sobre un mapa (García, 2004).



Fuente: CONAGUA, (2015).

### **3.6. Sequía**

El fenómeno de sequía se ocasiona por una disminución en la precipitación por debajo del promedio que ocurre en un área determinada y, que se extiende por un amplio lapso de tiempo, que puede ir desde una estación del año hasta varios años consecutivos, y que origina un déficit en el abastecimiento del recurso hídrico para una actividad, un grupo o un sector ambiental (Campos, 2014, citado por OMM, 2012). Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación o por un periodo de tiempo mayor, y la precipitación no es suficiente para responder a las demandas hídricas de la sociedad y del medio ambiente, la sequía debe considerarse como un estado relativo y no absoluto (OMM, 2012).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016), señalan que las sequias son una parte normal del clima y pueden darse en todos los regímenes climáticos del mundo, incluso en desiertos y bosques lluviosos. Se consideran como uno de los peligros naturales más costosos año tras año: sus efectos son considerables y generalizados, al perjudicar a muchos sectores económicos y personas en cada ocasión. Las sequias pueden caracterizarse por su gravedad, localización, duración y desarrollo cronológico. Pueden ser originadas por varios procesos hidrometeorológicos que suprimen la precipitación o limitan la disponibilidad de agua superficial o subterránea, de manera que aparecen condiciones mucho más secas de lo normal o se limita de otra manera la humedad disponible hasta un punto potencialmente perjudicial.

#### **3.6.1. Índice normalizado de precipitación (SPI)**

El Índice Normalizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), se ideó para cuantificar el déficit de la precipitación para varias escalas temporales, las cuales reflejan el impacto de la sequía en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Es un potente y flexible índice sencillo de calcular; el cual considera solo un parámetro necesario para su cálculo, siendo este la precipitación. Las condiciones de humedad del suelo responden a anomalías de precipitación en una escala relativamente corta. Las anomalías de precipitación a largo plazo, quedan reflejadas en las aguas subterráneas, los caudales fluviales y el almacenamiento en reservorios (OMM, 2012).

El cálculo del SPI para cualquier área, se basa en el registro de precipitaciones a largo plazo para un período deseado. Dicho registro a largo plazo, se ajusta a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal, de modo que, el SPI medio para la zona y el período deseado sea cero (Edwards y McKee, 1997, citados por OMM, 2012). Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor, siendo que el SPI está normalizado, los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo, por lo que también se puede hacer un seguimiento de los períodos húmedos empleando el SPI (OMM, 2012).

Giddings *et al.* (2005) citados por Escobar Pedraza (2011) recomiendan que el cálculo del SPI para un período de tiempo dado, en un área determinada, se haga con base a los registros de precipitación de, como mínimo, 30 años. La clasificación del SPI se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación del índice estandarizado de precipitación (SPI).

<b>Valores de SPI</b>	<b>Categoría</b>
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
0.99 a -0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Muy seco
-2.00 o menor	Extremadamente seco

La metodología para el cálculo del SPI fue el descrito por Edwards y McKee (1997), y el *software SPI SL 6.exe* es de distribución gratuita y se puede conseguir en la página web del National Drought Mitigation Center. El SPI se desarrolló para clasificar la lluvia observada como una salida estandarizada con respecto a una función de distribución de probabilidad de lluvia. Indica cómo la precipitación para cualquier duración dada (1 mes, 2 meses, etc.) en una observación particular el sitio se compara con el registro de precipitación a largo plazo en el mismo sitio de la misma duración (Edwards y McKee, 1997, citados por Giddings *et al.*, 2005).

Giddings *et al.* (2005), indican que conceptualmente, el SPI es equivalente a la puntuación Z utilizada a menudo en estadística:

$$\text{Puntaje Z} = (X - \text{Promedio}) / \text{Desviación estándar}$$

Donde el puntaje z enuncia la distancia del puntaje X del promedio en unidades de desviación estándar. Un pre-ajuste primario a esta formulación estándar de puntaje z reconoce que la precipitación es típicamente positiva. Para ajustarse a este hecho empírico, los datos de precipitación se transforman en una distribución simétrica más normal o gaussiana aplicando la función gamma. Después de que los datos de precipitación se hayan transformado, el SPI se calcula de manera que muestre la fórmula del puntaje z y se pueda interpretar de manera similar.

Según Velasco, Aparicio, Valdés, Velázquez y Kim (2004) citados por Castillo-Castillo *et al.* (2017), en regiones áridas es conveniente precisar el índice a escalas mayores a un mes, ya que escalas menores no permiten distinguir entre el déficit de lluvia respecto a las condiciones de largo plazo, ni a las variaciones propias de la precipitación, por lo que, para efectos prácticos, una escala apropiada es la de tres meses, dado que la cuenca presenta climas muy secos, secos, semi-secos y subhúmedos en su territorio.

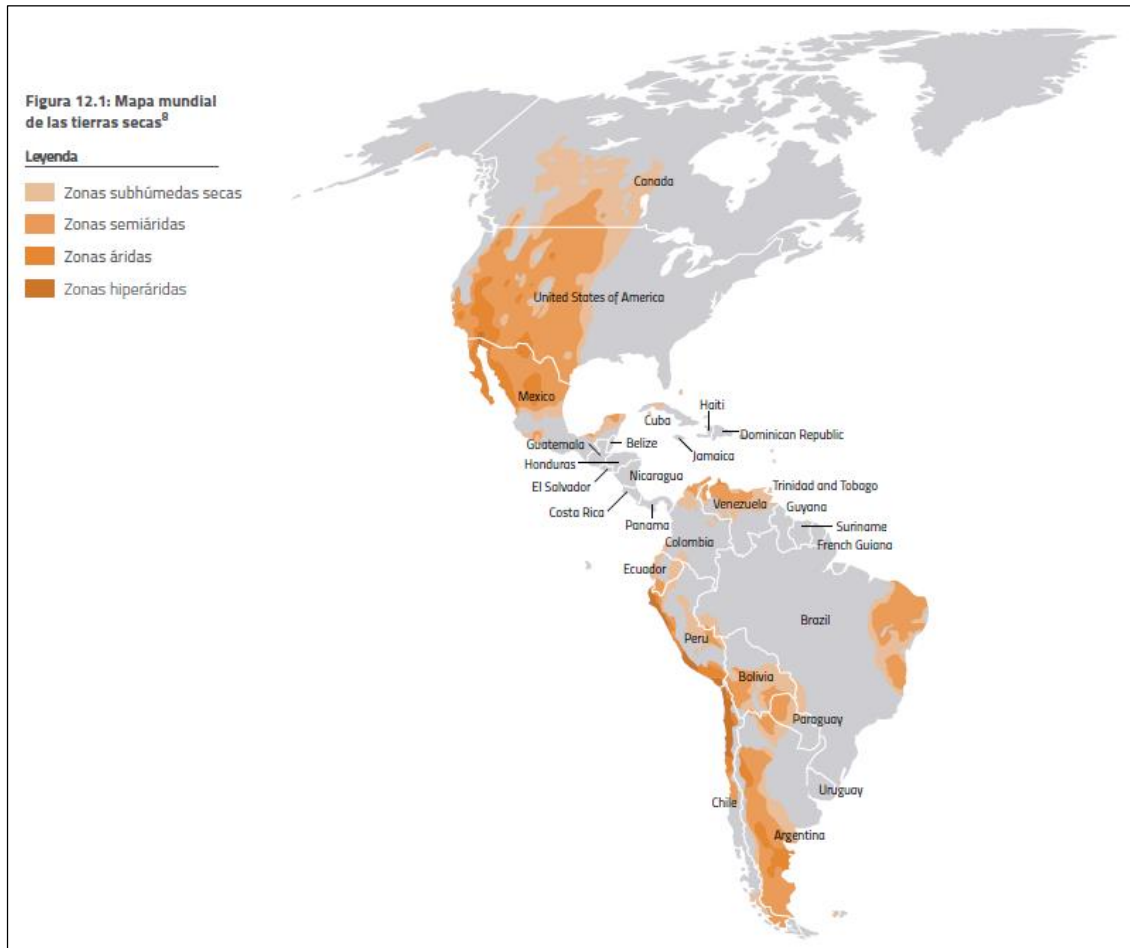
Se establece una escala de valores concentrado en tramos asociados al carácter de la precipitación, donde valores de SPI superiores a 2, indican periodos extremadamente húmedos y valores inferiores a -2, muestran periodos de sequía extrema (Mestre *et al.*, 2009, citados por Segundo de Jesús, 2018).

### **3.7. Aridez**

La palabra aridez es de origen latino (*aridus*), que significa seco. La aridez es algo más que sequía, dado que en su concepto intervienen diversos elementos y factores climáticos, entre los que destacan las altas temperaturas, bajas precipitaciones y la intensa radiación (Trovo Diéguez *et al.*, 2014). La aridez aparece por la presencia de anticiclones estables o como efecto de la continentalidad, aunque en algunos casos es consecuencia de barreras montañosas, que impiden el paso o la llegada de corrientes de aire húmedo (Salinas-Zavala *et al.*, 1998, citados por Mercado-Mancera *et al.*, 2010).

La pluviosidad, la temperatura y la evaporación son considerados los tres factores básicos cuyos valores en proporciones diversas, determinan la aridez de un lugar (Stretta

y Mosiño, 1963). La aridez es un indicador fehaciente de las condiciones hídricas, presente cuando la precipitación es escasa (Velasco y Pimentel, 2009).

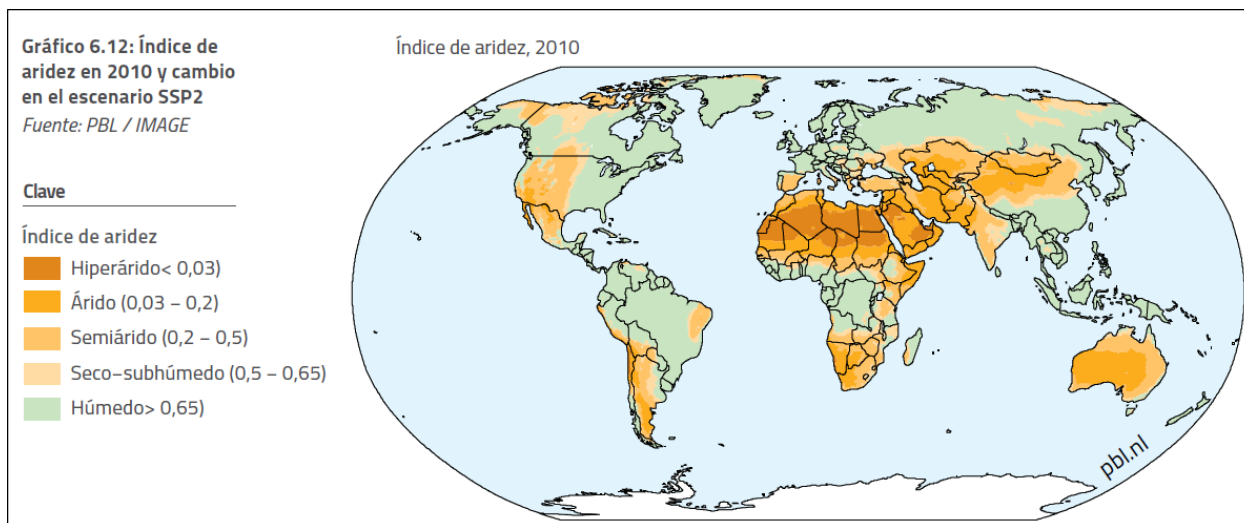


Fuente: Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación, (CNULD). (2017).

### 3.7.1. Índice de aridez

Los índices de aridez proporcionan valores acerca de la resequead de un área determinada y son valiosos en las investigaciones de resistencia a sequía, tanto para catalogar un lugar en particular, como para interpretar los resultados (Pedroza Sandoval, 1995).

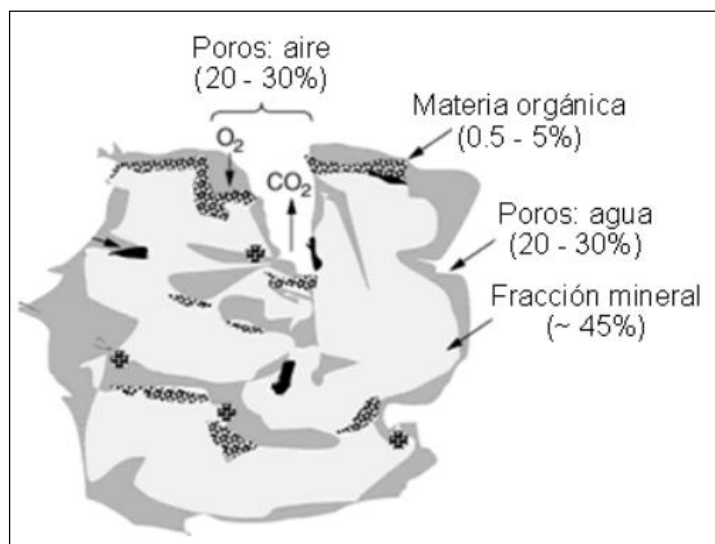
Los índices de aridez son funciones continuas de precipitación y/o temperatura, u otras variables hidro-meteorológicas, comúnmente empleados para cuantificar la definición de sequía (Banimahd & Khalili, 2013).



Fuente: Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación, (CNULD). (2017).

### 3.8. Suelos

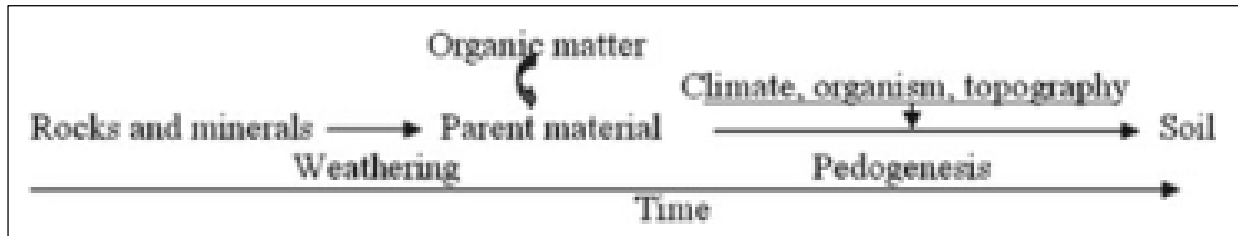
Los suelos son materiales naturales no consolidados en la superficie de la tierra y están compuestos de sólidos, líquidos y gases. Tienen materia orgánica e inorgánica, que se combinan íntimamente por procesos naturales. Hay cuatro componentes principales del suelo: materia mineral, materia orgánica, agua y aire (Towhid, 2013).



Fuente: INECC, (2007). <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html>

El suelo ha evolucionado a través de procesos pedogénicos como un cuerpo dinámico y tridimensional. Los suelos han alcanzado la capacidad de soportar diversos ecosistemas en la tierra. Proporcionan a las plantas anclaje, nutrientes, agua, aire y calor y las protegen de las toxinas. Los suelos tienen funciones ecológicas cruciales: es un

transformador de energía, es un reciclador de materiales, es un purificador de agua y, sobre todo, funciona como un componente del ecosistema (Towhid, 2013).



Fuente: Towhid, (2013).

El suelo es un recurso no renovable y finito, lo que simboliza que su pérdida y degradación no son reversibles en el curso de una vida humana. Del suelo depende el desarrollo agrícola, la sostenibilidad ecológica, los combustibles y muchos otros servicios ecosistémicos esenciales (Fernández Prias, 2015).

El objetivo del levantamiento de suelos es el conocimiento de su variabilidad, registrando las diferencias de un lugar a otro y como capturar en mapas esta información. Al estudiar, clasificar y cartografiar suelos, existe una inherente dependencia con la escala de observación. A escala semirregional, la variabilidad de muchas propiedades del suelo está relacionada, en primer plano, con diferencias en un factor formador de suelo. A escala local, las variaciones se presentan por pequeños cambios en la topografía y grosor de las capas del material parental, o por los efectos de la cobertura vegetal (Bautista, 2011).

### 3.9. Erosión eólica e hídrica

La erosión es un fenómeno natural o antrópico de permanente transformación de la superficie del suelo, esta principalmente ligado a la interacción con el agua o el viento, como primeros factores degradantes (UNESCO, 2009).

Se define a la erosión hídrica como la remoción del suelo debido a la acción de la lluvia (SEMARNAT, 2012). Este proceso estriba principalmente de la cantidad e intensidad de las precipitaciones, las propiedades intrínsecas de los suelos, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal (Huerta-Fernández y Loli-Figueroa, 2014).

La erosión eólica se define como la remoción del suelo por efecto del viento. La importancia de la evaluación de la erosión, se refleja en sus efectos en el sitio de incidencia, pérdida de capa arable, remoción de los nutrientes útiles a las plantas,

modificación de la velocidad de filtración de agua en el suelo, disminución de la capacidad de retención por el suelo, entre otros (Gómez-Sántiz, 2016).

Para México, los datos de erosión hídrica (EH) o eólica (EE) históricamente han sido contradictorios, por ejemplo, López-Santos (2016) consideró tres fuentes con valores de EH y EE: 29.5 y 30.7 % (Garrido y Cotler, 2010), 11.8 y 9.5 % (SEMARNAT, 2011) y 35 y 20 % (CONAFOR-UACH, 2013) sobre la magnitud del territorio nacional (1.9 millones de km<sup>2</sup>). EH y EE mostraron incertidumbres de 15.2 y 13.8 %; estos valores evidentemente ocasionan escenarios diferentes de la misma problemática (López-Santos *et al.*, 2017).

Respecto a esta controversia, CONAFOR-UACH (2013) señala que la causa más probable de esas divergencias, tiene que ver con los métodos más usados, que han incluido observaciones de campo, empleo de ecuaciones paramétricas, como la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), USLE revisada (RUSLE) y el desarrollo de algoritmos asociados a imágenes de satélite (López-Santos *et al.*, 2017).

### **3.10. Cuencas**

Para Muñoz (s/f, citado por Ordoñez, (2011)), la cuenca es una unidad del territorio en donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua, simultáneamente con los subsistemas ecológico, económico, social y político. Por ello, es de gran relevancia conocer los procesos físicos de generación y circulación por las que pasa el agua dentro de una cuenca. De acuerdo con Llerena (2003), el concepto de cuenca como unidad territorial natural es el más importante ya que a partir de esta apreciación se puede entender que únicamente en la cuenca hidrográfica es posible realizar balances hídricos. Es decir, cuantificar la oferta de agua que “produce” la cuenca durante el ciclo hidrológico.

Una cuenca incluye ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares, entre otros) y ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, humedales, etc.), y sus límites se forman por el parteaguas desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado por éste, hasta un punto de salida. En la cuenca hidrográfica, se diferencian por lo general tres sectores característicos: alto, medio y bajo, los cuales en función a las características topográficas del medio pueden influir en sus procesos



hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos (Llerena, 2003, citado por Ordoñez, 2011).

Los territorios de las cuencas confieren bienes y servicios ambientales invaluable para nuestra existencia, como son el suministro de agua dulce, la regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, la regulación de la erosión, o la respuesta a eventos naturales extremos, entre otros (Balvanera y Cotler, 2009, citados por Cotler Ávalos, 2010).

En México, la primera delimitación de las cuencas hidrográficas fue determinada por Antonio García Cubas, durante los años turbulentos previos a la Revolución, posterior a esto siguieron diversos esfuerzos institucionales para delimitar, cada vez con más exactitud, estas unidades hidrográficas. A algunas de estas cuencas se les adjudicaron, desde mediados del siglo pasado, organizaciones ad hoc para su gestión (Mollard y Vargas, 2005, citados por Cotler Ávalos, 2010). Finalmente, en el 2007 se concibió un primer mapa consensuado de cuencas hidrográficas entre tres instituciones gubernamentales (INEGI-INE-CONAGUA, 2007, Cotler Ávalos, 2010).

## 4. Materiales y métodos

### 4.1. Ubicación y descripción del área de estudio

De acuerdo con los insumos cartográficos del portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la subcuenca Río Medio Aguanaval se ubica en las coordenadas  $24^{\circ} 37' 57''$  latitud Norte y  $103^{\circ} 15' 36.37''$  longitud Oeste. Abarca una superficie aproximada de 834,879.20 ha (CONABIO, 1998), se sitúa al Este del estado de Durango y en menor proporción en los estados de Zacatecas y Coahuila (Figura 1). El área de estudio se ubica en la Provincia Mesa del Centro y en las subprovincias Sierra y Llanuras del Norte y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande, su rango altitudinal va de los 1,400 a los 2,600 msnm.

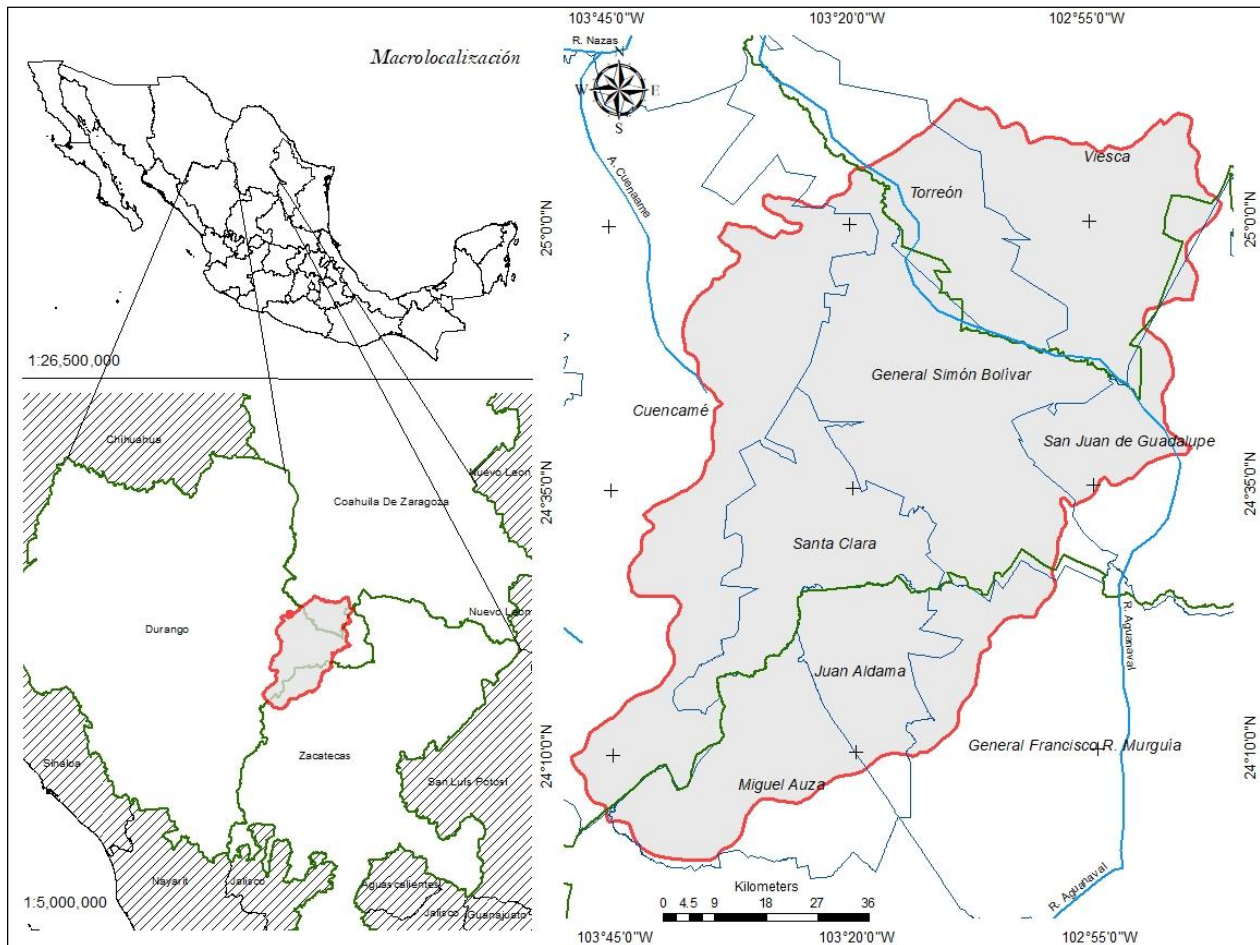


Figura. 1. Ubicación geográfica de la subcuenca Río Medio Aguanaval.

Fuente: Elaboración propia.

Son cinco los tipos de clima presentes en la subcuenca: clima muy árido semicálido (BWhw), árido semicálido (BSohw), semiárido templado (BS1kw), árido templado (BSokw) y semiárido semicálido (BS1hw) (García y CONABIO, 1998). El rango de precipitación es de 125 a 600 mm anuales y el rango de la temperatura fluctúa de 16 a 22°C (Cuervo Robayo, *et al.*, 2014). El principal uso de suelo es el matorral (INEGI, 2016). Con base en la Serie edafológica II de INEGI (2014), las unidades de suelo presentes son treinta y nueve, prevaleciendo el *Phaeozem epipetrocalcarico* (PH pcp). El área comprende varios sistemas de topofomas desde sierras, lomeríos, mesetas, llanuras, valles y bajadas (Lugo-Hubp, *et al.*, 1992).

#### **4.2. Insumos cartográficos y programas utilizados**

Los insumos cartográficos empleados para la presente investigación se enlistan a continuación:

- Capa raster de la precipitación media anual (elaboración propia)
- Capas raster de la temperatura máxima y mínima
- Capa vectorial de subcuencas hidrológicas de México (Escala: 1:1, 000,000)
- Capa vectorial de división política estatal y municipal (Escala: 1:1, 000,000 y 1: 250,000)
- Capa vectorial de curvas de nivel para la República Mexicana (Escala: 1: 250,000)
- Capa vectorial de rangos de precipitación (Escala 1: 4, 000,000)
- Capas vectoriales de las series edafológicas I y II (Escala: 1:1, 000,000 y 1: 250,000)
- Capa vectorial de los sistemas de topofomas de México (Escala: 1:4, 000,000)
- Capa vectorial de uso de suelo y vegetación serie VI (Escala 1:250,000)

Los datos de precipitación, se descargaron de la página de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) referidos al periodo 1902 - 2011.

Los programas utilizados para procesar la información fueron Excel y ArcGIS 10.1® (ESRI, Redlands, CA; USA) con sus diferentes herramientas.

### 4.3. Metodología

#### 4.3.1. Análisis climatológico e índice normalizado de precipitación (SPI)

La caracterización climatológica a partir de datos históricos (1970 – 2018), se realizó al analizar las 31 estaciones meteorológicas seleccionadas de la página de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ubicadas en la región de la subcuenca Río Medio Aguanaval. Se seleccionaron las estaciones meteorológicas que cumplieron con el criterio de calidad y consistencia empleado por López Santos *et al.* (2015), que considera un registro mínimo de información de 30 años y un 80 % de datos completos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas analizadas.

Estado	ID	Nombre	Municipio	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud	Años de registro	Porcentaje de datos completos
Coah	5004	Bajío de Ahuichila	Viesca	1,300	25.116°	-102.632°	49	96.78
	5026	Presa Coyote	Torreón	1,223	25.542°	-103.469°	77	93.88
	5029	Presa La Flor	Torreón	1,300	25.068°	-103.284°	54	92.43
	5036	San Pedro	San Pedro	1,100	25.757°	-102.996°	53	97.90
	5040	Torreón OBS	Torreón	1,123	25.520°	-103.431°	38	91.91
	5041	Viesca	Viesca	1,100	25.319°	-102.808°	75	92.90
	5139	Emiliano Zapata	Viesca	1,110	25.489°	-102.943°	39	94.31
	5178	Tejaban de la Rosita	Viesca	1,200	25.275°	-103.206°	26	99.50
	5184	Tanque Aguilereño	Viesca	1,460	24.815°	-102.950°	33	87.43
	10001	Atotonilco	Cuencamé	1,950	24.641°	-103.698°	38	99.16
10004	Cañón de Fernández	Cuencamé	1,200	25.265°	-103.774°	65	92.95	
10012	Cuencamé	Cuencamé	1,600	24.869°	-103.698°	61	95.47	
10030	Guadalupe Victoria	Guadalupe Victoria	2,000	24.446°	-104.122°	53	94.40	
Dgo	10047	Narciso Mendoza	Poanas	2,063	23.942°	-103.960°	53	97.93
	10055	Pedriceña	Cuencamé	1,310	25.116°	-103.788°	74	89.07
	10063	San Bartolo	Canatlán	2,000	24.527°	-104.656°	74	98.36
	10070	San Marcos	Santa Clara	2,000	24.294°	-103.543°	64	97.45
	10074	Santa Clara	Santa Clara	1,800	24.469°	-103.353°	46	98.38
10080	Simon Bolívar	Gral. Simon	1,525	24.688°	-103.226°	43	95.19	

	10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	1,531	24.631°	-102.783°	55	93.56
	10108	Ciudad Lerdo	Lerdo	1,140	25.546°	-103.522°	42	97.54
	10135	Cuauhtémoc	Cuencamé	2,175	24.251°	-103.796°	40	92.98
	10136	Doce de Diciembre	Cuencamé	1,950	24.706°	-103.573°	41	91.86
	10146	Yerbanís	Peñón Blanco	1,840	24.737°	-103.586°	38	90.52
	10150	Luis Moya	Peñón Blanco	1,920	24.553°	-103.964°	38	81.95
	32004	Camacho	Mazapil	1,665	24.444°	-102.374°	76	91.06
	32021	Colonia González Ortega	Sombrerete	2,195	23.957°	-103.448°	46	90.22
	32028	Juan Aldama	Juan Aldama	1,999	24.282°	-103.398°	53	91.33
Zac	32038	Gral. Fco R. Murguía	Gral. Fco R. Murguía	1,913	24.001°	-103.019°	74	97.31
	32049	San Francisco	Gral. Fco R. Murguía	1,680	24.325°	-102.885°	72	98.56
	32050	San Gil	Gral. Fco R. Murguía	1,829	24.196°	-102.978°	47	90.14

Para facilitar el análisis, las estaciones se agruparon por estado: para Coahuila se analizaron 9 estaciones, para el estado de Durango, 16 estaciones y para Zacatecas, 6 estaciones (Figura 2). Se realizó un Cuadro de estadísticas básicas con los valores históricos, así como la representación gráfica del comportamiento de la precipitación y temperatura en el periodo de registro.

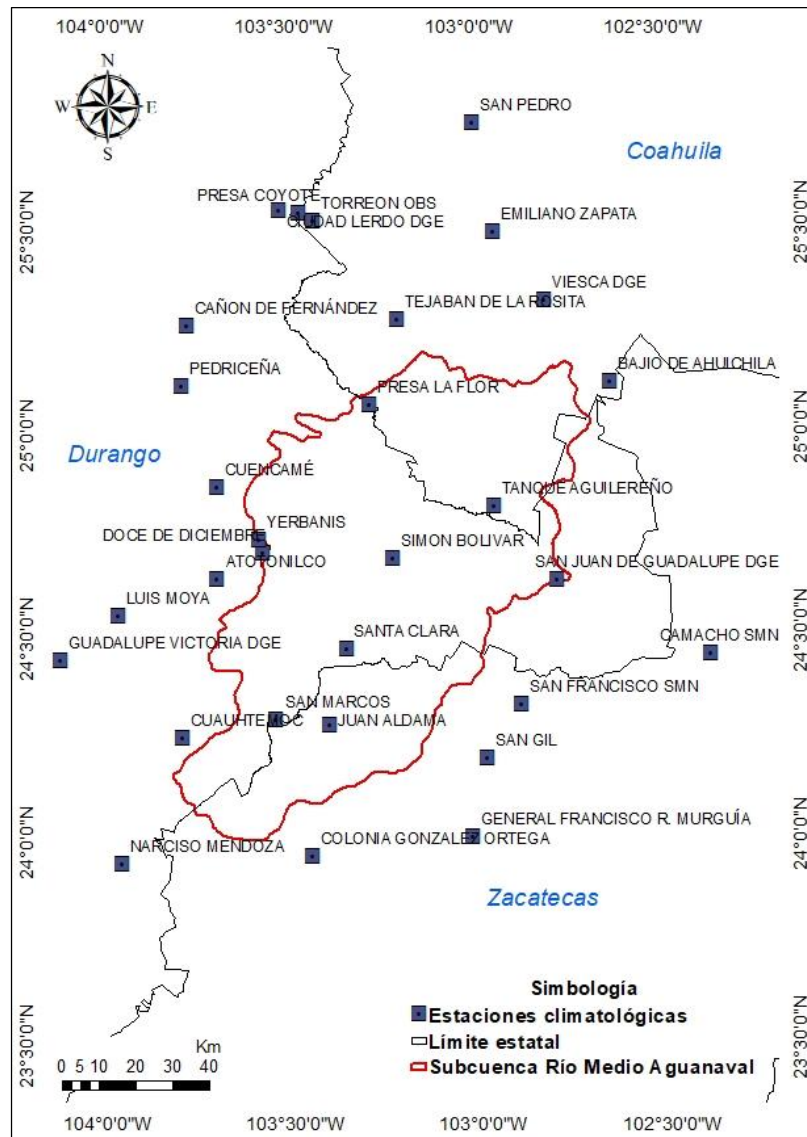


Figura. 2. Distribución de las estaciones meteorológicas analizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Para categorizar la precipitación de la subcuenca, se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés). Se empleó como indicador de periodos de sequía o de excesos de humedad. Este índice representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico, el cual queda representado por 0. Los valores negativos del SPI representan déficit de precipitación, y los valores positivos indican que la precipitación ocurrida ha sido superior al promedio histórico (Giddings *et al.*, 2005, citados por Escobar Pedraza *et al.*, 2012). Se consideró la metodología descrita por McKee *et al.* (1993), empleando el

*software SPI SL 6.exe* de distribución gratuita, desarrollado por el National Drought Mitigation Center. Con este software se calculó el SPI para las 31 estaciones de la subcuenca a una escala temporal de 12 meses. La categorización del SPI se basó en la clasificación de la Organización Meteorológica Mundial (2012). Se graficó el comportamiento del SPI por lustro para la subcuenca, además se realizó una interpolación utilizando el programa ArcGIS®, mediante los datos puntuales de cada estación.

#### **4.3.2. Índice de aridez Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963)**

Los archivos descargados de la página UNIATMOS, con registro de 1902 a 2011, se descomprimieron y se cargaron al software ArcGIS® 10.1, donde a través de sus herramientas como *Model Builder*, *Extract by mask* y *Raster Calculator*, además del archivo base (vectorial de la subcuenca) se crearon los raster de precipitación media anual (PMA) de la subcuenca. En cuanto a la temperatura máxima y mínima, solo se identificó el mes más caliente y el mes más frío. Para el cálculo del índice de Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963) se empleó la siguiente expresión:

$$IA = \frac{(M + 45)(M^2 - m^2)}{PMA} \quad (2)$$

Donde:

IA: índice de aridez Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963)

PMA: precipitación media anual (mm)

M: temperatura media máxima del mes más caliente (mm)

m: temperatura media mínima del mes más frío (mm)

45: constante

Para obtener el raster final del índice de aridez, mediante la calculadora raster, se ingresó la expresión anterior, posteriormente, se realizó una conversión de raster a polígono para calcular las superficies con base en las categorías encontradas.

Por último, se generó una tabla para analizar la distribución de cada rango y clasificación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación del índice de Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963).

Índice	Ambiente climático	
De 53 a 67	B3	Zonas Semiáridas
De 67 a 118	A3	
De 118 a 222	B2	Zonas Áridas
De 222 a 500	A2	
De 500 a 1000	B1	Zonas Desérticas
>1000	A1	

#### 4.3.3. Índice de aridez De Martonne (1926)

Para obtener del índice de aridez De Martonne (1926), se requirió de los datos de precipitación media anual y de la temperatura media de la subcuenca y utilizando el software ArcGIS® 10.1, se empleó la siguiente expresión:

$$IA = \frac{PMA}{TMA + 10} \quad (3)$$

Donde:

IA: índice de aridez De Martonne (1926)

PMA: precipitación media anual (mm)

TMA: temperatura media anual (°C)

10: constante

Se hizo una conversión de raster a polígono para calcular superficies de acuerdo a las categorías encontradas, además, se generó una tabla para analizar la distribución de cada rango y clasificación (Cuadro 4).

Cuadro 4. Zonificación climática según el índice De Martonne (1926).

Intervalo	Clasificación IM
De 0 a 5	Desiertos (hiperárido)
De 5 a 10	Semidesierto (árido)
De 10 a 20	Semiárido
De 20 a 30	Sub-húmeda
De 30 a 60	Húmeda
>60	Hiperhúmeda



#### 4.3.4. Erosión hídrica y eólica laminar

La metodología empleada fue la propuesta por SEDESOL-INE en 1998, dirigida para Ordenamientos Ecológicos Generales del Territorio Nacional, la cual tiene como objetivo distinguir el tipo de erosión laminar hídrica o eólica a la que está sujeta un área. Dicha metodología ha sido empleada en diversos estudios, como en López Santos *et al.* (2013) y López-Santos y Martínez-Santiago, (2015), la cual consta de tres fases:

- Definir el área de influencia de erosión hídrica laminar o erosión eólica laminar.
- Evaluar la erosión laminar hídrica y erosión laminar eólica a través de índices y calificadores.
- Clasificar el nivel de degradación en función de una serie de grados de erosión establecidos mediante rangos de pérdida de suelo, medido en toneladas por hectárea por año.

La Figura 3 muestra los pasos a seguir para definir área de influencia de erosión hídrica y eólica laminar.

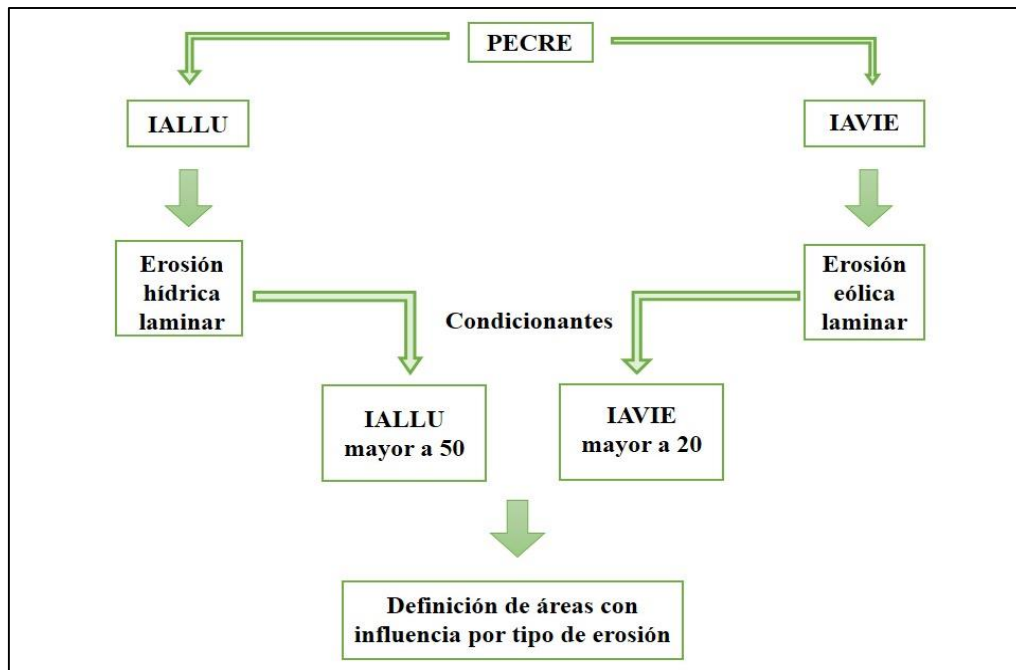


Figura. 3. Esquema para definir áreas de influencia de erosión laminar en la SRMA.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4.1. Insumo principal (PMA) y áreas de influencia erosiva

La metodología de SEDESOL-INE requirió como insumo principal a la precipitación media anual (PMA) de la subcuenca, que se obtuvo a través del programa ArcGIS® 10.1. Para conocer el área de influencia de erosión laminar tanto hídrica como eólica, se basó en la precipitación media anual de la subcuenca Río Medio Aguanaval, de la PMA (raster) se obtuvo el período de crecimiento (PECRE), que se define como el número de días al año con disponibilidad de agua y temperatura favorable para el desarrollo de un cultivo. Este se obtuvo a través del álgebra de mapas del software.

$$\text{PECRE} = 0.2408 (\text{PMA}) - 0.0000372 (\text{PMA})^2 - 33.1019 \quad (4)$$

Con el valor del PECRE (raster) se calculó el Índice de Agresividad de la Lluvia (IALLU) y el Índice de Agresividad del Viento (IAVIE), índices adimensionales.

$$\text{IALLU} = 1.1244 (\text{PECRE}) - 14.7875 \quad (5)$$

$$\text{IAVIE} = 160.8252 - 0.7660 (\text{PECRE}) \quad (6)$$

Por regla, la metodología establece que, si el valor de IALLU es mayor a 50, se considere como zona de influencia para el estudio de erosión hídrica laminar. En cuanto al IAVIE si el valor de éste es mayor a 20, se define como área con influencia de erosión eólica laminar. Definida el área, lo siguiente fue obtener los factores que nos permitieron, junto con los índices de agresividad, conocer la cantidad de suelo perdido ( $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) en la subcuenca debido a la erosión hídrica y eólica.

#### 4.3.4.2. Evaluación de la erosión hídrica laminar

Para evaluar la erosión hídrica laminar se consideraron cuatro calificadores CAERO, CATEX, CATOP y CAUSO, como lo indica la metodología. El primero que se consideró es el Calificador por Erodabilidad (CAERO) referido a la susceptibilidad que tiene el suelo a erosionarse. Como preparación del insumo, se realizó una homologación edafológica de las unidades de suelo presentes en la subcuenca de las series I y II del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), con base en las características intrínsecas de las unidades de suelo. Se editó el Cuadro de atributos del archivo vectorial

y debido a que en la subcuenca se presentaron varias unidades de suelo, se realizó un promedio ponderado.

$$CAERO (total) = \frac{(CAERO \text{ unidad de suelo } i) * (\text{Porcentaje de ocurrencia de la unidad de suelo } i)}{100} \quad (7)$$

La Calificación de textura y fase (CATEX) se obtuvo considerando los tres tipos de textura, gruesa media y fina. Los valores asignados para CATEX se obtuvieron de la metodología SEDESOL-INE.

$$CATEX (total) = \frac{(CATEX \text{ de textura y fase } i) * (\text{Porcentaje de ocurrencia de cada textura y fase } i)}{100} \quad (8)$$

Para el Calificador de la topografía (CATOP), que considera la pendiente o la topoforma, se trabajó con el vectorial de sistemas de topoformas, con el cual se observó la distribución de las diferentes topoformas presentes en el área. Los valores asignados para CATOP se obtuvieron de la metodología SEDESOL-INE.

$$CATOP (total) = \frac{(CATOP \text{ de topoforma } i) * (\text{Porcentaje de ocurrencia de cada topoforma } i)}{100} \quad (9)$$

El Calificador por uso de suelo (CAUSO), es el último a considerar, en el cual se empleó el archivo vectorial de la serie VI del INEGI de uso de suelo y vegetación. Los valores asignados para CAUSO se obtuvieron de la metodología SEDESOL-INE.

$$CAUSO (total) = \frac{(CAUSO \text{ por uso de suelo } i) * (\text{Porcentaje de ocurrencia de cada uso de suelo } i)}{100} \quad (10)$$

Cada uno de los calificadores, al término de la edición de sus atributos, se les aplicó un proceso de rasterización. Los valores correspondientes a cada calificador los establece la metodología y con base en la misma, los cuatro calificadores son adimensionales.

#### 4.3.4.3. Clasificación de la erosión hídrica laminar

La pérdida de suelos por erosión hídrica laminar se mide en toneladas por hectárea por año ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), fue determinada para la subcuenca Río Medio Aguanaval, donde se multiplican todos los calificadores y el índice de agresividad de la lluvia, mediante el álgebra de mapas de ArcGIS 10.1, introduciendo las capas raster de todos los calificadores de la metodología SEDESOL-INE. La pérdida de suelo se clasificó de acuerdo al Cuadro 5.

$$Erosi3n\ h3drica = IALLU \times CAERO \times CATEX \times CATOP \times CAUSO \quad (11)$$

Cuadro 5. Clasificaci3n de la erosi3n h3drica laminar.

CLASE DE DEGRADACI3N	VALOR DE EROSI3N LAMINAR
Ligera	Menor de 10 t ha <sup>-1</sup> a3o <sup>-1</sup>
Moderada	De 10 a 50 t ha <sup>-1</sup> a3o <sup>-1</sup>
Alta	De 50 a 200 t ha <sup>-1</sup> a3o <sup>-1</sup>
Muy Alta	Mayor de 200 t ha <sup>-1</sup> a3o <sup>-1</sup>

Fuente: SEDESOL-INE. (1998).

#### 4.3.4.4. Evaluaci3n de la erosi3n e3lica laminar

Para evaluar la erosi3n e3lica laminar se consideraron dos calificadores CATEX y CAUSO. La Calificaci3n de textura y fase (CATEX) se obtuvo determinando primero, los grupos de suelos calc3reos o no calc3reos. La metodolog3a presenta el Cuadro 6 con los grupos de suelo calc3reos, estos suelos pertenecen a la serie edafol3gica I de INEGI, por lo cual se tom3o como base la homologaci3n de las series I y II de INEGI, para posteriormente asignarle un valor con base a la textura y fase.

Cuadro 6. Clasificaci3n para CATEX (suelos calc3reos).

CATEX	TEXTURA Y FASE DE SUELOS CALC3REOS
3.5	1
1.75	2
1.85	3
0.87	Pedregosa o Gravosa

Fuente: SEDESOL-INE. (1998).

En el caso de los grupos de suelo no calc3reos, se calific3o la textura y la fase considerando el Cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación para CATEX (suelos no calcáreos).

CATEX	TEXTURA Y FASE DE SUELOS NO CALCÁREOS
3.5	1
1.25	2
1.85	3
1.75	1 y Fase Gravosa o Pedregosa
0.62	2 y Fase Gravosa o Pedregosa
0.92	3 y Fase Gravosa o Pedregosa

Fuente: SEDESOL-INE. (1998).

Para la edición del archivo vectorial se realizó a través de la Ecuación 8, presentada anteriormente. Para el Calificador por uso de suelo (CAUSO) se empleó el vectorial de la serie VI de INEGI de uso de suelo y vegetación. Los valores asignados para CAUSO se obtuvieron del Cuadro 8 de la metodología SEDESOL-INE, para la edición se empleó la Ecuación 10, presentada anteriormente. Cada uno de los calificadores, al término de la edición de sus atributos, se les aplicó un proceso de rasterización.

Cuadro 8. Clasificación para CAUSO.

CAUSO	VEGETACIÓN
0.70	Agricultura de Temporal
0.20	Agricultura de Riego
0.15	Monte o Matorral
0.30	Pastizal
0.35	Coníferas

Fuente: SEDESOL-INE. (1998).

#### 4.3.4.5. Clasificación de la erosión eólica laminar

La pérdida de suelo por erosión eólica laminar ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) fue determinada para la subcuenca Río Medio Aguanaval donde se multiplican los calificadores y el índice de agresividad del viento. Esto se efectuó a través del álgebra de ArcGIS® 10.1, introduciendo las capas raster de los calificadores. La pérdida de suelo por erosión eólica laminar se clasificó de acuerdo con el Cuadro 9.

$$Erosión\ eólica = IAVIE \times CATEX \times CAUSO \quad (12)$$

Cuadro 9. Clasificación de la erosión eólica laminar.

<b>CLASE DE DEGRADACIÓN</b>	<b>VALOR DE EROSIÓN LAMINAR</b>
Sin erosión	Menor de 12 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Ligera	De 12 a 50 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Moderada	De 50 a 100 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Alta	De 100 a 200 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Muy Alta	Mayor de 200 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>

Fuente: SEDESOL-INE. (1998).

#### **4.3.5. Cambios en la Cubierta Vegetal**

Para el eje de cambios en la cobertura vegetal (CCV), el primer eje de la NDT, se requirieron varios insumos vectoriales tales como las Series de Uso de Suelo y Vegetación (USV) II, III, IV, V y VI con escala de 1: 250,000, además el archivo edafológico Serie II, los tipos de clima, la capa de subdivisión municipal y la capa vectorial de la subcuenca, todos los archivos en formato vector; esta información cartográfica se descargó del portal del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Cada una de las Series de USV se analizaron en el programa ArcGIS® 10.1, se revisaron cada una de las clasificaciones para determinar con cuales series se podía emplear la comparación empleando una hoja de homologación de USV (Cuadro 10), que consideró los criterios para definir los grupos y tipos de vegetación como el grupo de vegetación, etapa, fase de desarrollo (arbórea, arbustiva y herbácea). Posteriormente, se realizó un análisis sobre los cambios encontrados, considerando aumento y disminución de superficies.

Cuadro 10. Homologación de los grupos de vegetación.

IPCC, 1996 <sup>a</sup>		INEGEI, 2009 (Nacional) <sup>b</sup>	INEGEI, 2006 (Nacional) <sup>c</sup>	INEGI-DURANGO (USV-Serie III) <sup>d</sup>	INEGI-DURANGO (USV-Serie IV) <sup>e</sup>	
BOSQUES TEMPLADOS	Grupo 1. Siempreverdes	Bosque de Coníferas	Bosque de Coníferas	Bosque de Pino	Bosque de Coníferas	
				Bosque de Pino-Encino	Bosque Cultivado	
				Bosque de Táscate		
				Bosque Bajo Abierto		
				Bosque de Oyamel		
	Grupo 2. Latifoliadas	Bosque de Encino	Bosque Latifoliadas	Encino	Bosque de Encino	
Bosque Mesófilo de Montaña		Bosque de Encino-Pino		Bosque Mesófilo		
BOSQUES TROPICALES	Grupo 3. Húmedos	Selva Subcaducifolia	Selva Alta y Media	Selva Media Subcaducifolia	Selva Subcaducifolia	
			Matorral	Matorral subtropical		
	Grupo 4. Estacionales	Selva Espinosa	Selva Baja	Selva Baja Espinosa	Selva Caducifolia	
		Selva Caducifolia	Selva Baja	Selva Baja Caducifolia		
	Grupo 5. Secos	Matorral Xerófilo	Matorral	Mezquital	Matorral Xerófilo A	
				Matorral Submontano		
				Matorral Crasicaule		
				Matorral Desértico Micrófilo		
				Matorral Desértico Rosetófilo		
				Matorral Sarcocaula		
				Chaparral		
	Pastizal	Pastizal	Pastizal	Vegetación Gipsófila	Matorral Xerófilo S	
Vegetación Halófila						
Arenosos						
Grupo 6. Pastizal	Pastizal	Pastizal	Pastizal Halófilo	Pastizal		
	Pecuario		Pastizal Natural			
			Pastizal-Huizachal			
			Pastizal Cultivado- Agricultura de Temporal			
	Vegetación inducida		Vegetación inducida	Pastizal	Pastizal Inducido	Vegetación Inducida 2
					Pastizal Inducido, Agricultura de Temporal	
Pastizal Inducido, Vegetación Secundaria de Selva						

Fuente: Pinto-Espinoza, Martínez-Prado y López Santos, (2014).

Las tasas de cambio se determinaron a partir de la siguiente ecuación (FAO, 1996 citado por Camacho-Sanabria, 2015):

$$t = \left( 1 - \left( \frac{S2}{S1} \right)^{\frac{1}{n}} \right) * 100 \quad (13)$$

Donde:

*t*: corresponde a la tasa de cambio

*S1*: es la superficie cubierta por un tipo dado de uso del suelo en la fecha 1

*S2*: es la superficie del mismo uso del suelo en la fecha 2 y

*n*: es el número de años transcurridos entre las dos fechas

La tasa de deforestación o de cambio es un indicador de presión sobre los recursos forestales y resulta un elemento esencial en la evaluación y diagnóstico del comportamiento de otras variables ambientales (clima, suelos, hidrología, entre otras) y socioeconómicas (crecimiento demográfico, densidad de población, actividades económicas, entre otras) asociadas (Palacio Prieto *et al.*, 2004).

#### **4.3.6. Productividad Primaria Neta (NDVI)**

El segundo eje fue la productividad primaria neta (PPN), medida a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El período de análisis, para este indicador comprendió desde 1990 a 2018, considerando el empleo de imágenes satelitales Landsat 4, 5 y 8, considerando dos por año, una anterior y otra posterior a la época de lluvias, la descarga y procesamiento de las imágenes de satélite dependió de la disposición y calidad del recurso digital. Dichos insumos se obtuvieron del portal EarthExplorer del United States Geological Survey (USGS), agencia científica que estudia el terreno, los recursos naturales y los peligros naturales que los amenazan. Las escenas a descargar fueron dos (path: 29 y 30, row: 043).

Dichas imágenes fueron corregidas atmosféricamente (radiancia y reflectancia), este proceso se realizó en el software libre QGIS 2.6.1 mediante su complemento *Semi-Automatic Classification*. Se realizaron compuestos de bandas para obtener una mejor visualización y poder realizar una clasificación supervisada por épocas (previa y posterior a las lluvias) mediante el clasificador de máxima probabilidad, que es uno de los más empleados en la clasificación supervisada. Posteriormente, se obtuvo el NDVI empleando



la banda roja (RED) e infrarroja cercana (IRC) corregidas previamente, estas corresponden a las bandas 3 y 4, respectivamente, para Landsat 4 y 5, y las bandas 4 y 5, respectivamente, para Landsat 8, con el fin de comparar los cambios en el tiempo. La escala de medida del índice NDVI oscila de -1 a 1 con el 0 representando el valor aproximado de la falta de vegetación. Se calculó de la siguiente manera:

$$NDVI(Landsat\ 4\ y\ 5) = \frac{(B4 - B3)}{(B4 + B3)} \quad (14)$$

$$NDVI(Landsat\ 8) = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)} \quad (15)$$

Donde:

NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada

B4: banda infrarroja cercana (Landsat 4 y 5)

B3: banda roja (Landsat 4 y 5)

B5: banda infrarroja cercana (Landsat 8)

B4: banda roja (Landsat 8)

Se aplicó, mediante la calculadora raster, una diferencia entre los años de análisis del NDVI, para ambas épocas.

#### **4.3.7. Reservas de Carbono Orgánico en el Suelo (COS)**

Para la obtención del carbono orgánico en el suelo (COS) en la subcuenca, se requirió del archivo vectorial de los perfiles edafológicos de INEGI (INEGI, 2014), el archivo vectorial de la subcuenca Río Medio Aguanaval (CONABIO, 1998) además del sistema de información geográfica ArcGIS 10.1 (ESRI® ArcMap™ 10.1). Mediante la herramienta *Geoprocessing*, se realizó un corte de archivo general de perfiles de suelo respecto al área de interés. Los datos de los perfiles de suelo se analizaron en una hoja de cálculo discriminándose información de los horizontes con profundidad igual o menor a 30 cm. Se empleó el programa Soil & Environment® (S&E), es una herramienta para evaluar las funciones ambientales de los suelos con los datos de los perfiles de suelo, el procedimiento para obtener el COS de la subcuenca, se realizó de acuerdo a lo publicado por Bautista, Gallegos, y Pacheco (2016), dicho programa se encuentra en <https://www.actswithscience.com/producto/soil-and-environment-se/>. En los perfiles no

se encontró la densidad aparente (DA), esta se calculó mediante un calculador de propiedades hidráulicas, que se puede encontrar en [http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis Fisico de Suelos/Calculador%20Textual.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_Fisico_de_Suelos/Calculador%20Textual.htm), el cual requirió de los valores porcentuales de arena y arcilla. Mientras que para calcular la materia orgánica (MO), se realizó conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

De manera general, el procedimiento consistió en llenar una plantilla del programa con los datos de los perfiles edafológicos, se generó la base de datos para cada uno de ellos y se cargó ésta al programa (Figura 4), el cual realizó una evaluación edafo-ecológica que proporcionó el valor de COS por horizonte y por perfil.

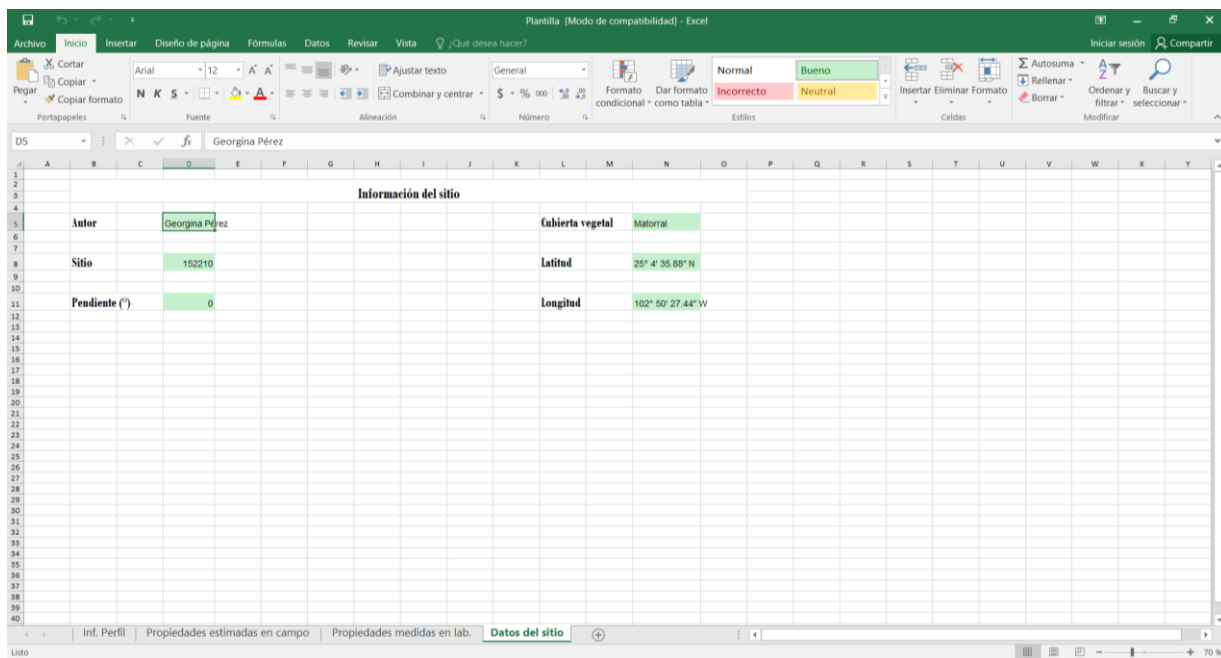


Figura. 4. Plantilla utilizada en el programa S&E.

Los valores obtenidos de COS se ordenaron respecto a cada perfil junto con su información general. Con dichos valores, se realizó una interpolación utilizando los cuatro geoestadísticos que maneja el software (IDW, Kriging, Natural Neighbor y Spline). Se analizó cuál de ellos arrojó la mejor interpolación con base en sus estadísticos.

#### 4.3.8. Fase de campo

Para la fase de campo, con el fin de elaborar una relación de la distribución de cada insumo cartográfico para la subcuenca, en el programa ArcGIS 10.1 se cargaron cada

uno de los archivos, mediante la herramienta *Geoprocessing* (Clip) se obtuvieron los cortes con base al vectorial de la subcuenca de cada uno de los insumos. Con base en este análisis, se determinaron las zonas de monitoreo, procurando abarcar diferentes usos de suelo y vegetación, tipos de suelo, climas y municipios. Considerando además el 10 % de superficie monitoreada y el poder agilizar el análisis con las imágenes de satélite, se eligieron 9 áreas (ventanas) de las imágenes de satélite para el monitoreo (Figura 5). Después del análisis de la información, obtenida y procesada, se realizaron verificaciones en campo, para la comprobación del procesamiento de la información, así como del estado actual de la subcuenca. Se colectaron muestras de suelo para conocer el contenido de COS y hacer la comparación con lo obtenido del programa S&E. Además, se utilizó un Drone para obtener escenas y video de cada una de las ventanas de monitoreo para comparar con lo encontrado en las imágenes de satélite. Esto se realizó ubicando el sitio de monitoreo, marcándolo como centro, se consideró una distancia de 50 m, para posteriormente realizar vuelos con el Drone, tomando como punto de partida el centro del sitio, cubriendo los cuatro puntos cardinales, hasta abarcar toda el área.

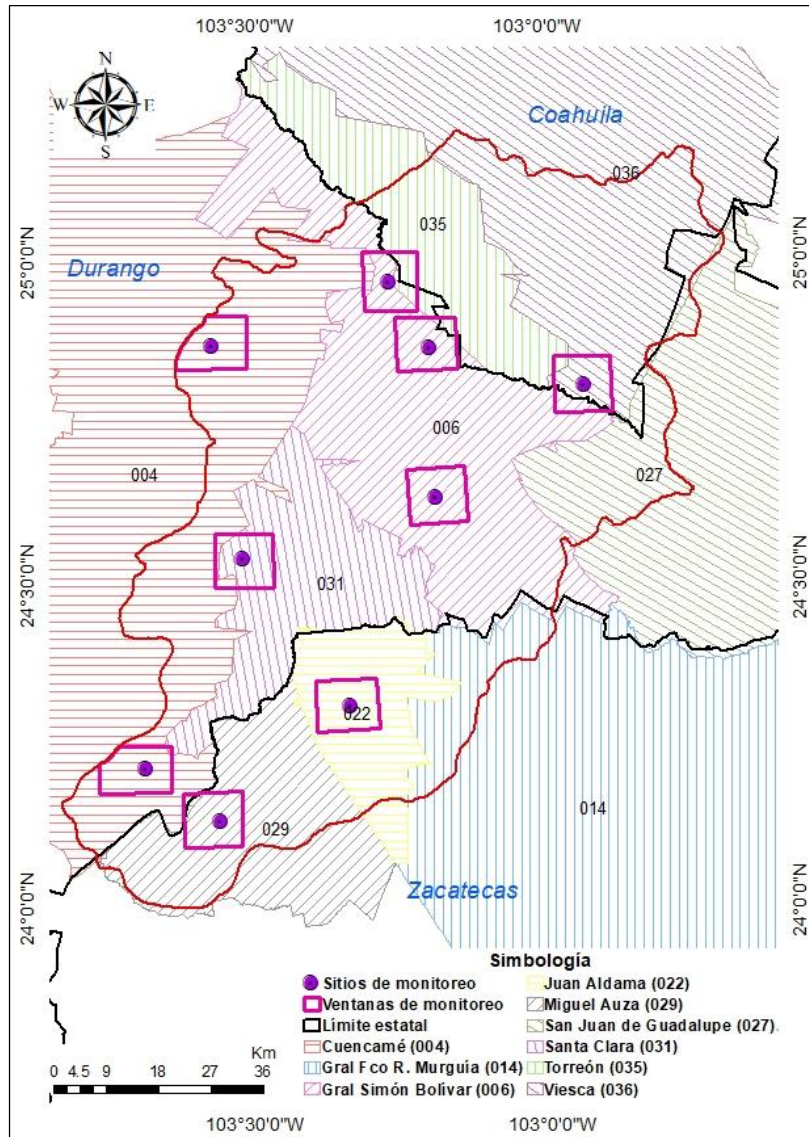


Figura. 5. Distribución de los sitios de muestreo.

## 5. Resultados y Discusión

### 5.1. Análisis climatológico e índice normalizado de precipitación (SPI)

Se analizaron 31 estaciones meteorológicas para los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas, respecto a las variables precipitación, temperatura máxima y mínima.

El análisis de la información pluviométrica anual corresponde al periodo de 1970 a 2018. El año más lluvioso registrado para la subcuenca Río Medio Aguanaval, fue 2004 con una precipitación total de 485.10 mm. Valores superiores a los 450 mm de precipitación se obtuvieron solo en 2003 y 2015. En 2018 se registró la menor cantidad de precipitación con aproximadamente 25 mm (Figura 6), esto está relacionado con la disponibilidad de información registrada por las estaciones para este año, ya que la mayoría de las estaciones no presentan información actualizada para este año. El año 2011 es el segundo año con menor registro (140 mm aproximadamente). Estos datos concuerdan con el rango de precipitación, para la zona, que señalan Cuervo Robayo *et al.*, (2014), el cual va de 125 a 600 mm.

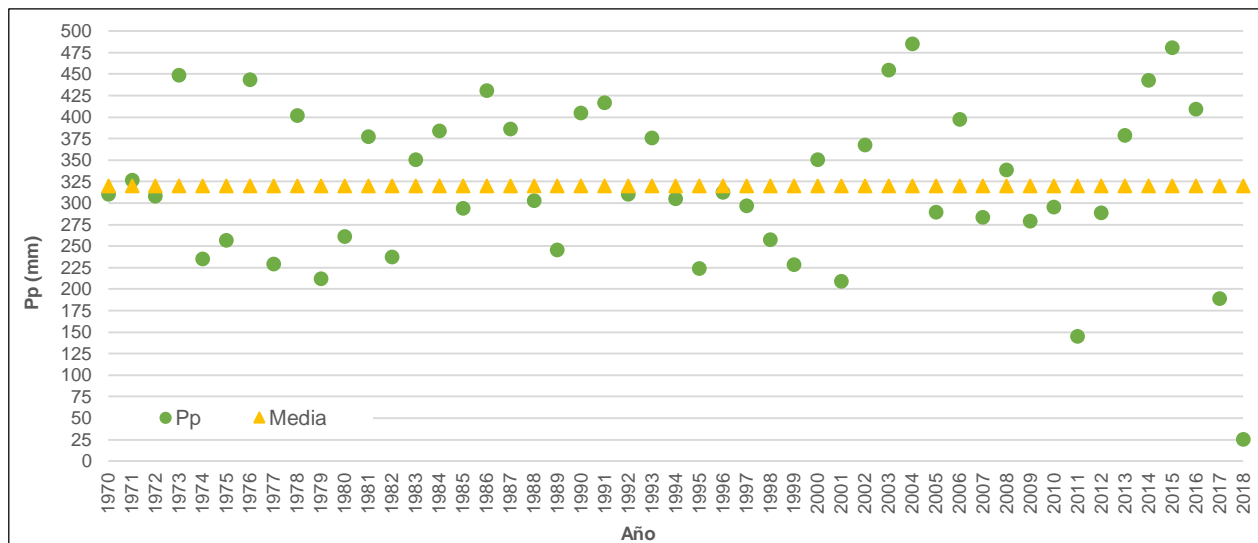


Figura. 6. Precipitación por año derivada de diversas estaciones climáticas distribuidas en la SRMA.

Al analizar la información por Estado, se encontraron valores promedio anual de precipitación, para Coahuila, que oscilan entre 79 y 327 mm/año (Figura 7). Las estaciones con los regímenes pluviales más altos corresponden a la estación Emiliano Zapata (5139) y Tejaban de la Rosita (5178), que se ubican a 1,110 y 1,200 msnm,

respectivamente, ambas en el municipio de Viesca. En cuanto a la temperatura mínima, la estación Bajío de Ahuichila (5004), es la que registra el promedio más bajo con 9 °C, respecto a las temperaturas máximas, la estación Viesca DGE (5041), registra los rangos más alto superando los 31 °C. En relación con la precipitación, ésta estación registra en promedio alrededor de 150 mm anuales.

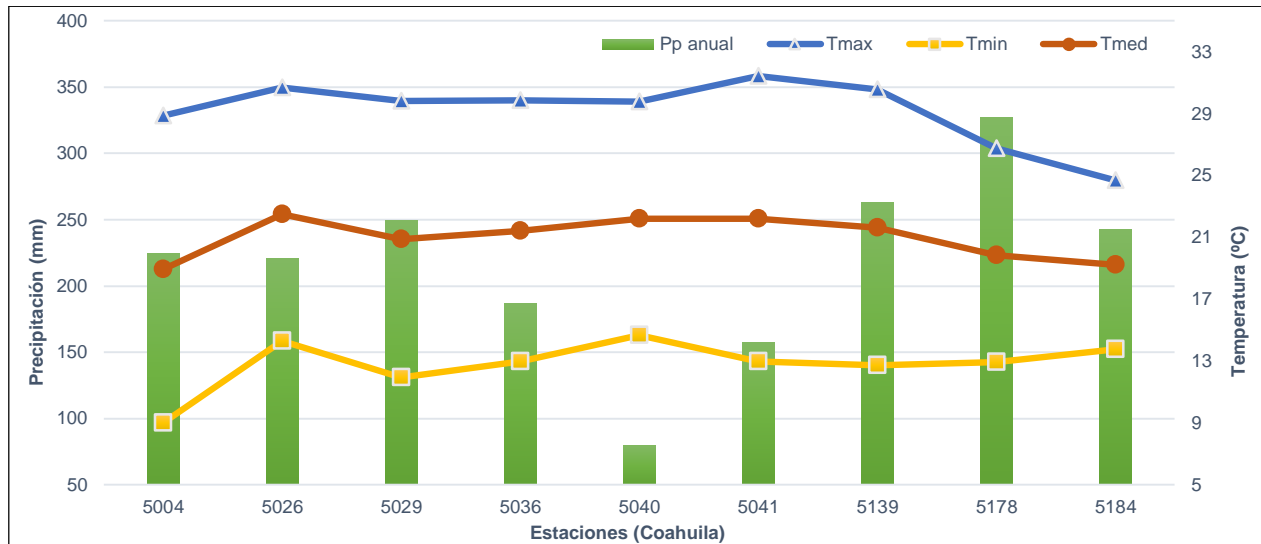


Figura. 7. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima para Coahuila de 1970 a 2018.

Cuatro de las 16 estaciones del estado de Durango, registran más de 400 mm anuales (Guadalupe Victoria DGE (10030), Narciso Mendoza (10047), San Marcos (10070) y Santa Clara (10074)) y solo dos estaciones (San Juan de Guadalupe DGE (10099) y Ciudad Lerdo DGE (10108)) registran menos de 300 mm anuales. Respecto a la temperatura mínima, los rangos oscilan entre 7 a 14.04 °C. Los rangos registrados, para la temperatura máxima, van de 23 a 30.04 °C (Figura 8). Las temperaturas máximas se distribuyen de la parte central a la zona oeste de la subcuenca.



Figura. 8. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima en Durango de 1970 a 2018.

Valores superiores a los 400 mm anuales de precipitación, en el estado de Zacatecas, los registra la estación Colonia González Ortega (32021), en el municipio de Sombrerete. Así como la estación Juan Aldama (32028) (Figura 9), ambas estaciones se encuentran al sur de la subcuenca Río Medio Aguanaval. No se encuentra una variación significativa en cuanto a la temperatura mínima y en cuanto a la temperatura máxima, los rangos van de 25 a más de 28 °C (Cuadro 11). La temperatura máxima se distribuye en la zona sur-este de la subcuenca.

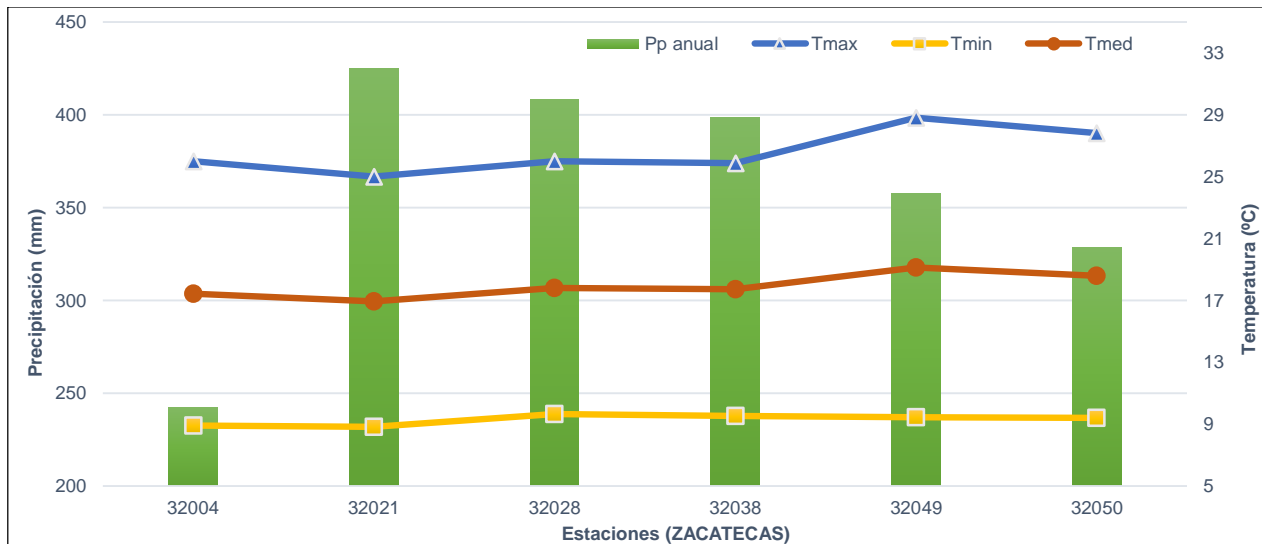


Figura. 9. Precipitación promedio anual, temperatura máxima y mínima en Zacatecas de 1970 a 2018.

Cuadro 11. Estadísticos descriptivos de las estaciones analizadas.

ID	Nombre	Precipitación					Temperatura máxima					Temperatura mínima				
		Media	Var	Desv. Est.	Máx	Mín	Media	Var	Desv. Est.	Máx	Mín	Media	Var	Desv. Est.	Máx	Mín
5004	Bajío de Ahuichila	224.13	9.89	2.99	85.00	0	28.87	32.16	5.62	45.00	1.00	9.01	44.84	6.65	26.00	-14.00
5026	Presa Coyote	220.66	12.97	3.34	101.50	0	30.69	38.04	6.15	44.00	2.00	14.31	37.64	6.12	28.00	-5.00
5029	Presa La Flor	249.14	11.32	3.18	75.00	0	29.83	26.08	5.06	42.00	0.00	11.92	37.82	6.09	27.00	-9.00
5036	San Pedro	186.85	10.77	2.97	106.00	0	29.88	37.74	6.12	43.00	1.00	12.99	42.01	6.47	28.00	-9.00
5040	Torreón OBS	79.47	3.03	1.35	59.20	0	29.77	36.43	6.02	43.40	1.60	14.66	36.52	6.03	34.50	-8.00
5041	Viesca	157.48	7.09	2.42	66.00	0	31.42	35.10	5.87	46.60	6.00	12.96	47.76	6.84	35.00	-13.00
5139	Emiliano Zapata	262.87	25.94	4.12	162.00	0	30.56	42.76	6.38	50.00	0.00	12.71	44.74	6.57	35.00	-8.00
5178	Tejaban de la Rosita	327.55	17.20	3.96	89.30	0	26.75	37.28	5.97	46.00	0.00	12.95	32.31	5.46	29.00	-11.00
5184	Tanque Aguilereño	242.97	12.74	3.40	60.00	0	24.68	44.01	6.32	43.00	0.00	13.76	34.34	5.70	33.00	-9.00
10001	Atotonilco	367.28	20.66	4.19	75.00	0	25.09	25.44	4.97	41.00	0.00	8.70	21.21	4.55	23.00	-11.00
10004	Cañón de Fernández	304.13	15.13	3.74	86.50	0	30.04	29.12	5.38	43.00	1.00	14.31	34.75	5.87	27.00	-4.00
10012	Cuencamé	379.54	20.42	4.43	82.50	0	29.80	26.81	5.15	44.00	5.10	12.86	24.64	4.95	24.00	-7.00
10030	Guadalupe Victoria	470.78	25.76	4.88	88.00	0	24.92	18.53	4.28	43.00	-5.00	8.42	24.94	4.97	20.00	-14.00
10047	Narciso Mendoza	495.35	23.24	4.72	74.80	0	26.28	17.36	4.15	38.50	0.00	8.10	25.04	4.99	20.00	-15.00
10055	Pedriceña	323.60	36.89	4.23	225.00	0	29.69	37.00	5.93	45.00	5.00	11.54	29.42	5.31	29.00	-6.00
10063	San Bartolo	379.52	18.72	4.19	82.00	0	26.96	13.99	3.68	38.00	0.00	7.44	22.52	4.72	18.00	-8.00
10070	San Marcos	457.86	23.14	4.70	64.00	0	27.73	24.66	4.91	41.00	0.00	8.32	20.63	4.50	19.00	-8.00
10074	Santa Clara	418.91	21.44	4.54	87.00	0	27.07	25.25	5.00	42.50	3.00	8.07	33.97	5.79	28.00	-13.00
10080	Simón Bolívar	351.58	20.47	4.25	98.50	0	29.20	26.93	5.15	48.00	0.00	8.46	23.53	4.68	23.00	-9.50
10099	San Juan de Guadalupe	291.13	16.16	3.74	85.00	0	26.09	18.66	4.22	48.00	2.00	9.95	21.40	4.48	26.00	-12.00
10108	Ciudad Lerdo	246.45	13.73	3.44	94.40	0	28.64	35.90	5.98	42.00	1.00	14.04	38.32	6.17	28.00	-8.00
10135	Cuauhtémoc	363.14	19.69	3.85	80.00	0	23.77	19.55	4.38	39.50	1.00	8.10	20.85	4.54	21.00	-9.00



10136	Doce de Diciembre	397.09	20.93	4.45	70.00	0	25.72	23.03	4.78	40.00	3.00	10.49	19.11	4.35	24.00	-7.00
10146	Yerbanís	361.44	18.70	4.01	97.00	0	26.19	27.57	5.17	45.00	1.00	9.31	28.56	5.30	32.00	-18.00
10150	Luis Moya	383.23	23.75	4.55	90.00	0	28.56	29.68	5.31	50.00	2.00	10.07	27.33	5.08	36.00	-16.00
32004	Camacho	242.42	10.21	3.05	62.00	0	25.98	28.85	5.31	39.00	2.00	8.91	27.34	5.18	25.00	-11.00
32021	Col. González Ortega	425.09	23.19	4.64	106.00	0	25.00	18.95	4.31	44.00	5.00	8.84	15.80	3.95	19.00	-12.00
32028	Juan Aldama	408.18	23.76	4.69	45.10	0	25.99	21.80	4.64	39.50	-5.00	9.65	22.71	4.74	24.50	-14.00
32038	Gral. Fco R. Murguía	398.62	20.84	4.40	83.00	0	25.89	22.99	4.75	39.00	-7.50	9.53	23.63	4.79	22.00	-10.00
32049	San Francisco	357.52	16.00	3.87	77.50	0	28.82	22.21	4.69	40.50	-2.50	9.45	37.82	6.12	21.00	-11.00
32050	San Gil	328.62	15.97	3.73	87.00	0	27.81	20.20	4.46	40.00	0.00	9.41	27.17	5.17	21.00	-12.00

Se obtuvo el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) medio, para 12 meses. Se representó por lustro desde 1970 hasta 2018, para la región de la subcuenca (Figura 10). El comportamiento del SPI muestra que en la subcuenca no se han presentado eventos de sequía considerable, ya que según Cieza Coronel y Mejía Marcacuzco (2019), los autores que diseñaron el SPI establecieron que para definir un período de sequía, según el cual, se dice que tiene lugar un período seco siempre y cuando el SPI presente una secuencia continua de valores negativos, tales que estos sean iguales o inferiores a -1, si bien se considera que este evento no llega a su fin hasta el momento en que dicho índice vuelva a tomar un valor positivo.

La subcuenca Río Medio Aguanaval, con base en el SPI obtenido, se clasifica en un nivel normal o aproximadamente normal (0.99 a -0.99) (Cuadro 12). Esto concuerda con lo revisado en la página del Monitor de sequía en México (CONAGUA), para los últimos años registrados (2014 – 2018), donde de acuerdo a sus mapas, la subcuenca no presentó sequías, con excepción del año 2015, el cual registró la categoría D0 anormalmente seco.

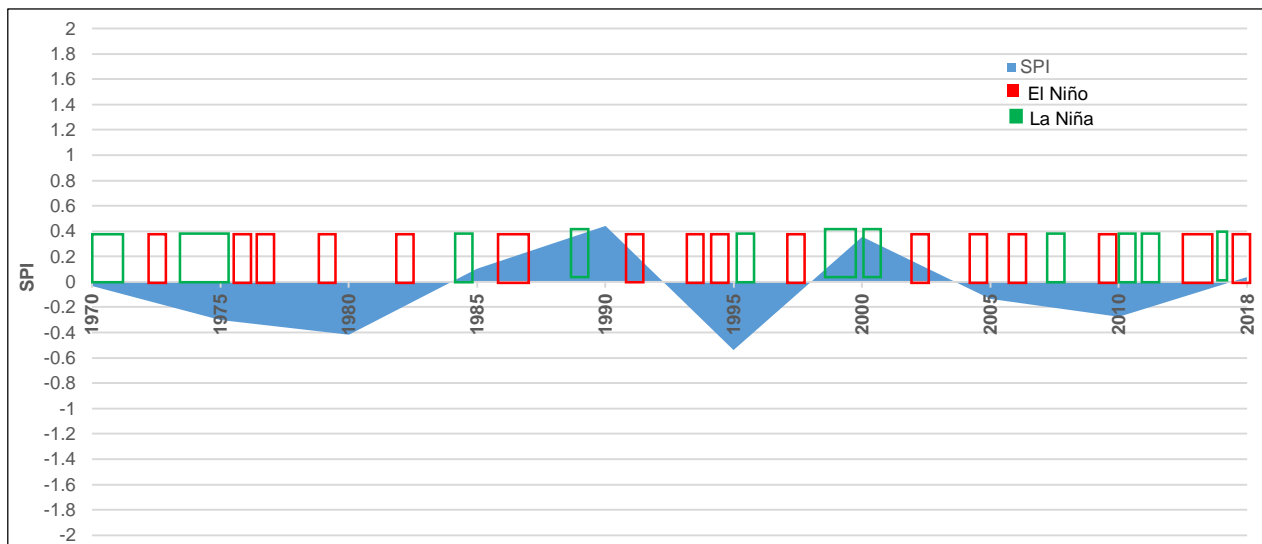


Figura. 10. Índice estandarizado de precipitación (SPI) medio para la subcuenca.

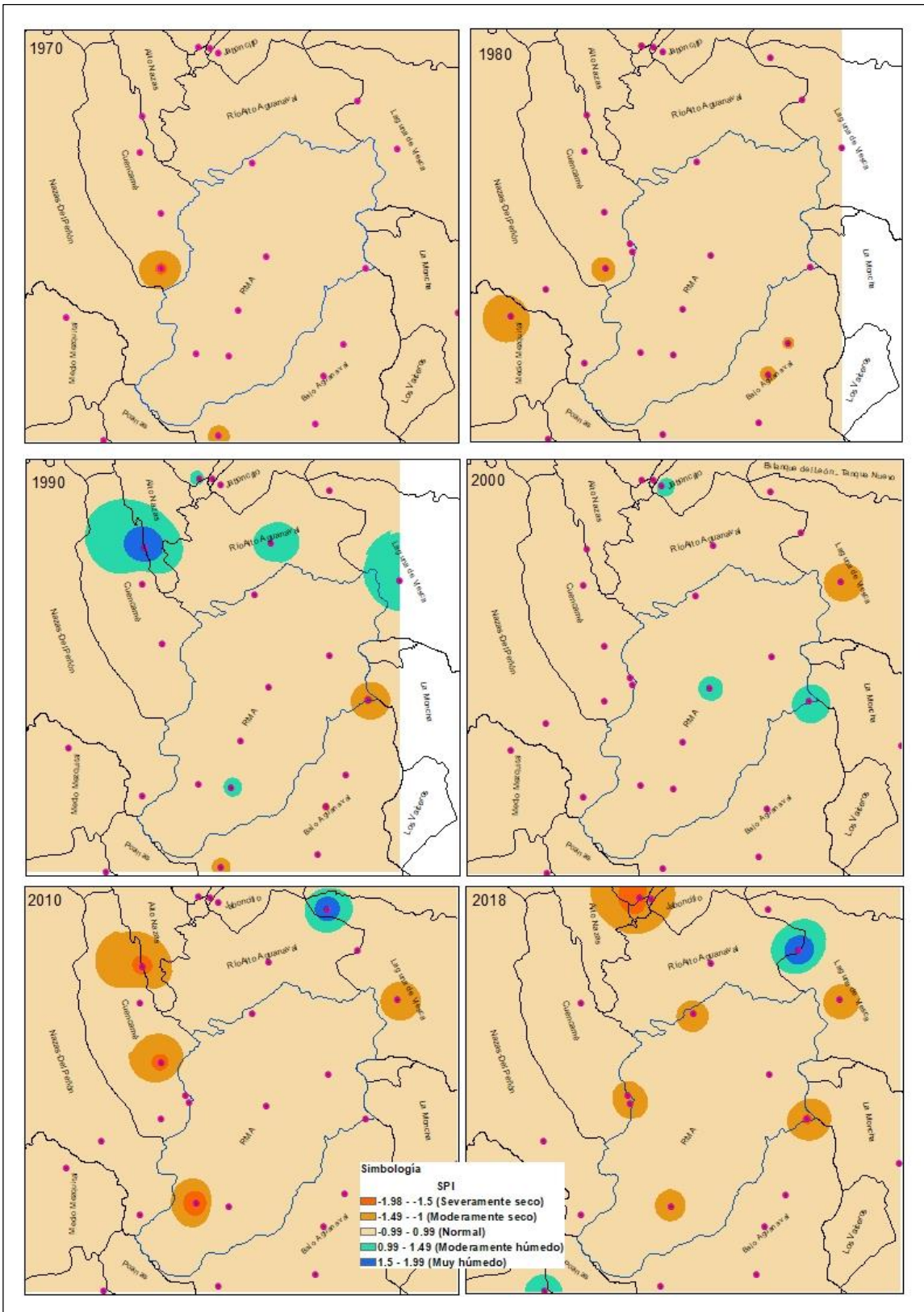


Figura. 11. Interpolación del SPI medio para la subcuenca RMA.

Cuadro 12. SPI por década para la subcuenca.

Categoría	Valor de SPI	Año					
		1970	1980	1990	2000	2010	2018
Extremadamente húmedo	2.00 o mayor						
Muy húmedo	1.50 a 1.99						
Moderadamente húmedo	1.00 a 1.49						
Normal o aproximadamente normal	0.99 a -0.99						
Moderadamente seco	-1.00 a -1.49						
Muy seco	-1.50 a -1.99						
Extremadamente seco	-2.00 o menor						

Rivera del Río *et al.* (2007) analizaron el comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, para el periodo de 1960 a 1990 a través del desarrollo de dos índices de sequía, el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI). La obtención, la preparación y el procesamiento de los datos lo realizaron con los programas de cómputo ERIC1, Surfer Versión 6.0 y Mathematica 4.0. Los resultados que obtuvieron en cuanto al SPI señalan que la categoría -cercano a lo normal- presentó los máximos valores de frecuencia, para el año 1971, lo cual sugiere que, para el estado de Durango, la precipitación ha mantenido un comportamiento con tendencia a lo normal para la serie de tiempo analizada. Además, indicaron que el índice estandarizado de precipitación (SPI) sobrestimó la recurrencia de periodos húmedos, para escalas de tiempo mensual.

En cuanto a la aplicación del índice Morid *et al.* 2006; Smakhtin and Hughes 2007, citados por Banimahd & Khalili, (2013), señalan que es útil y necesario considerar más de un índice para examinar la sensibilidad y precisión de los mismos, la correlación entre ellos y explorar qué tan bien se confirman entre sí en el contexto de un objetivo específico de investigación.

## 5.2. Índices de aridez

### 5.2.1. Precipitación media anual

Los valores de precipitación media anual (PMA) en la subcuenca Río Medio Aguanaval, obtenidos a través de la herramienta Model Builder (ArcGIS 10.1® ESRI, Redlands, CA, USA), concuerdan con los rangos de distribución de precipitación para la zona de Cuervo Robayo *et al.* (2014), presentando valores máximos de 524 mm (Figura 12)

correspondientes a la zona centro y suroeste de la subcuenca en los estados de Durango y Zacatecas. En la parte norte, Durango y Coahuila, se distribuyen los valores menores, relacionado esto a que el tipo de clima respectivo es muy árido, semicálido (BWhw).

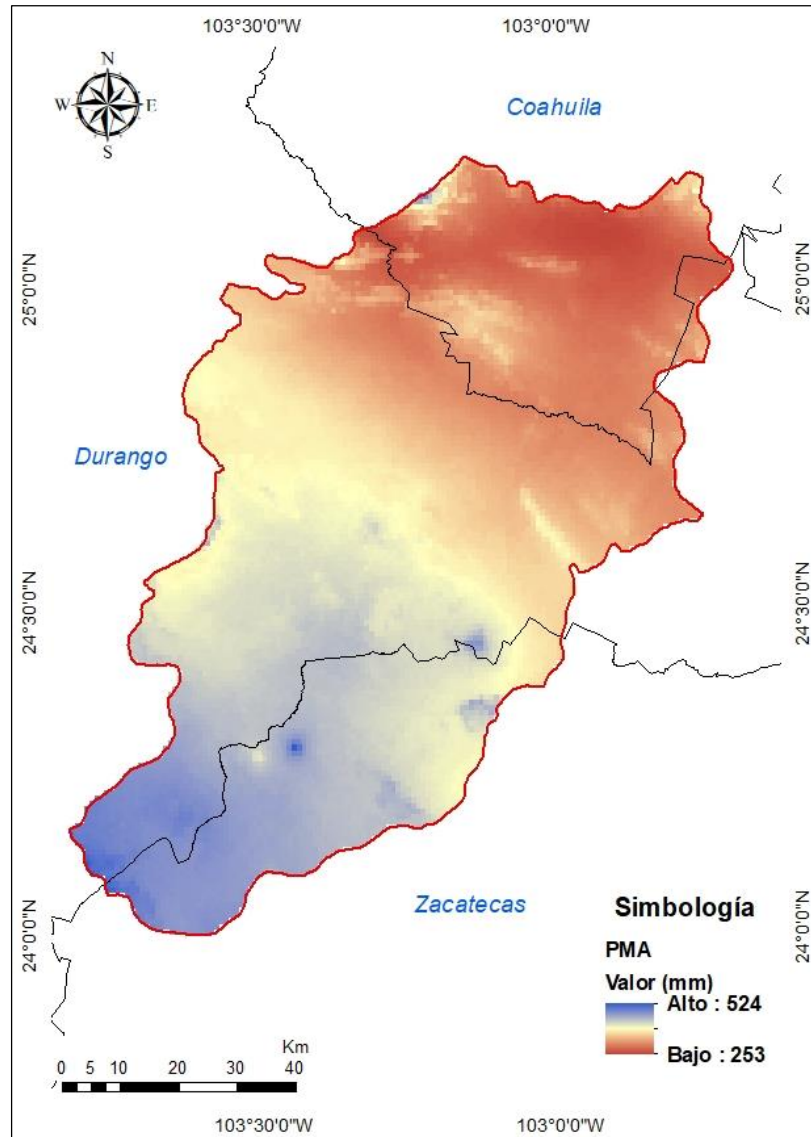


Figura. 12. Distribución de la precipitación en la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2. Índice de aridez Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963)

Para el índice de aridez de Emberger modificado por Stretta y Mosiño (1963), los insumos requeridos fueron tanto la PMA como los promedios del mes más frío y del mes más caliente. A través del análisis de la información climática mensual descargada de la página de UNIATMOS, se encontró que, en cuanto al promedio de las temperaturas

mínimas, el mes más frío corresponde a enero. Los registros del archivo raster marcan valores que van de -0.5 °C hasta más de los 8 °C (Figura 13). La distribución espacial muestra que la parte oriental de la subcuenca, presenta los valores mayores, en cuanto a los registros bajo cero, se distribuyen en las colindancias de los estados de Durango y Zacatecas. Respecto a los registros medios para el mes más caliente, el análisis indicó que el mes de julio obtuvo valores de más de 23 °C como mínimo, y los casi 34 °C como valor máximo (Figura 14).

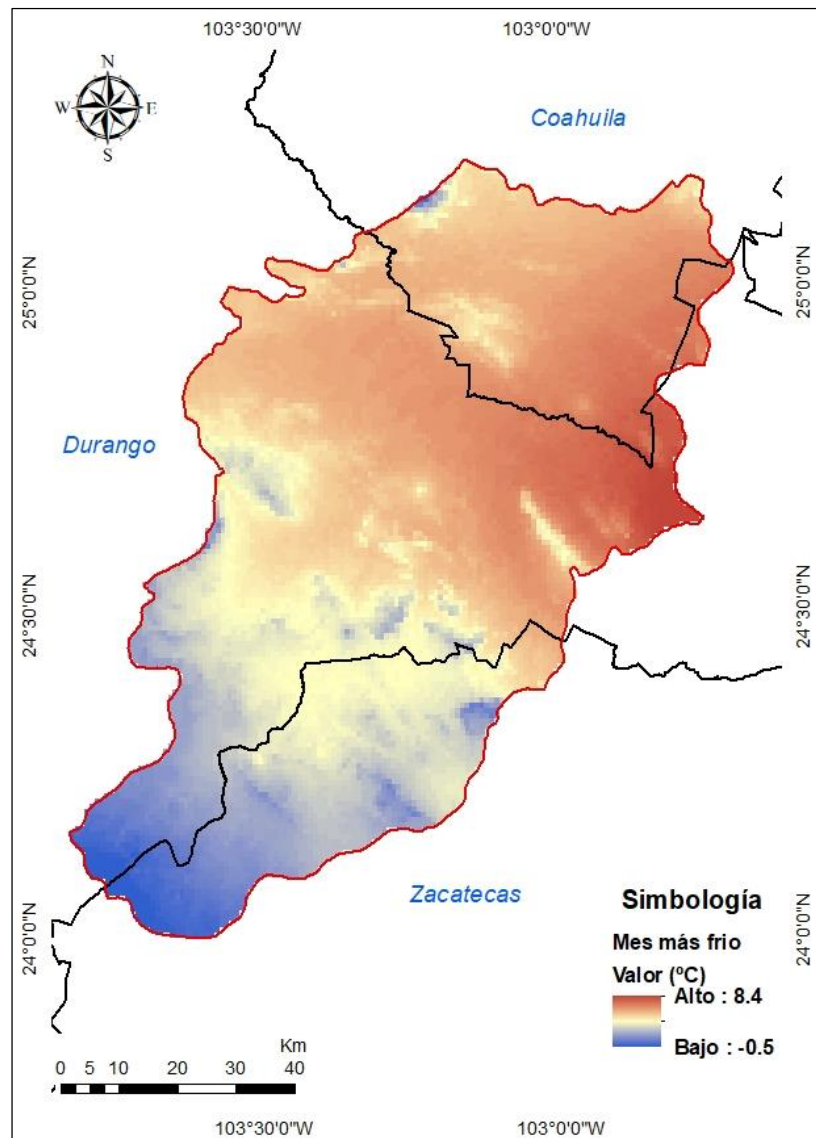


Figura. 13. Temperatura del mes más frío.

Fuente: Elaboración propia.

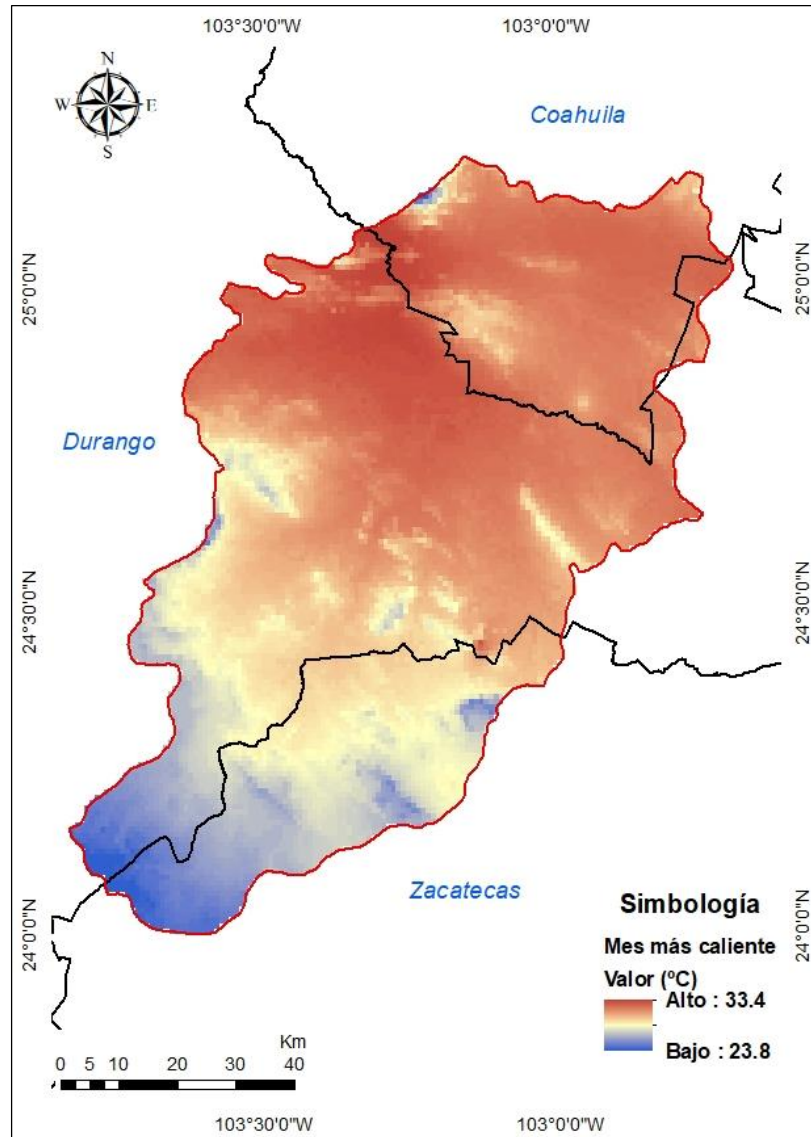


Figura. 14. Temperatura del mes más caliente.

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de la fórmula de Emberger modificada por Stretta y Mosiño (1963) para obtener el índice de aridez en la subcuenca, indica valores de 75 a 330, que, de acuerdo con la clasificación, se generaron 3 clases: zona árida (A2), zona árida (B2) y la zona semiárida (A3) (Figura 15). La distribución de estas categorías va de noreste a sureste, la primera es la zona árida (A2), que tiene rango de 222 a 500, se representa en un 31.38 % de la superficie de la subcuenca. La segunda categoría es la zona árida (B2), que representa a las áreas menos áridas de esta clasificación, se ubica en la parte central de la subcuenca, con un intervalo de 118 a 222, representando el 58.22 % de la subcuenca.

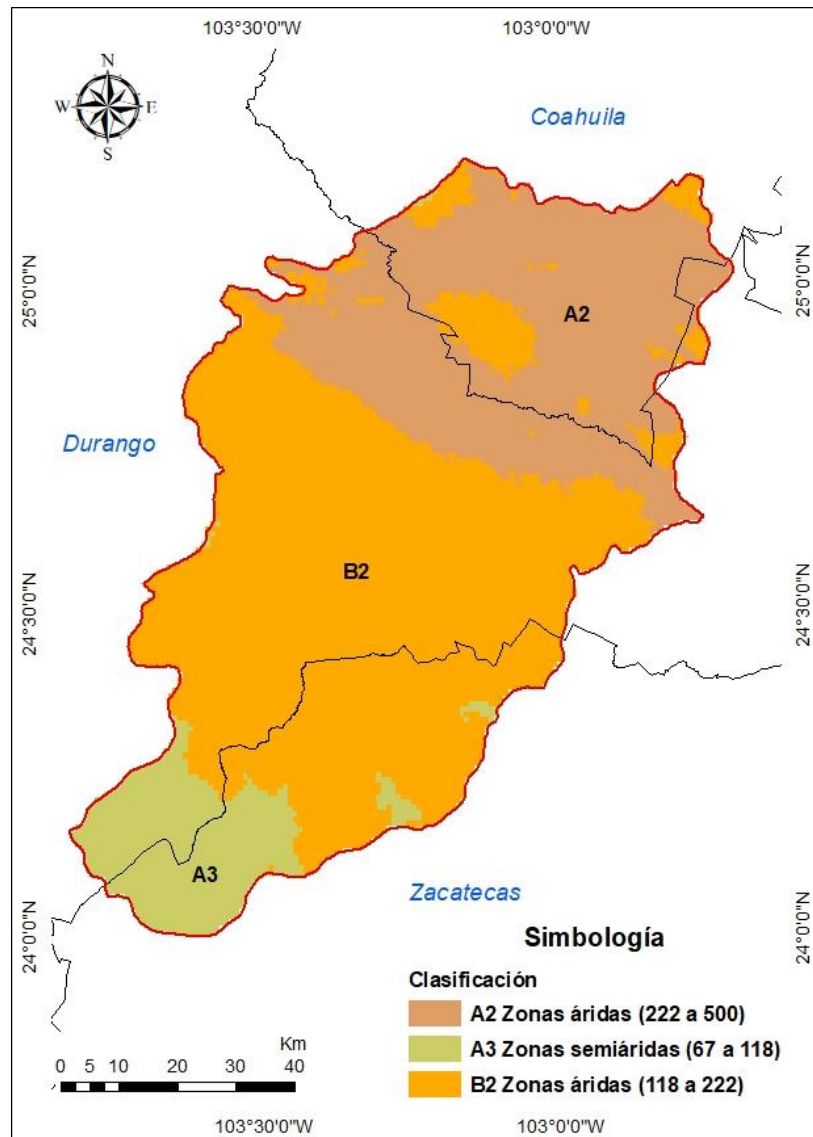


Figura. 15. Delimitación de categorías según el índice de aridez.

Fuente: Elaboración propia.

La tercera zona es la semiárida A3, con intervalo de 67 a 118, se distribuye al sur-suroeste de la subcuenca en poco más del 10 % (Cuadro 13). En esta última zona es donde se encuentran las áreas agrícolas de riego.

Cuadro 13. Clasificación del índice de aridez.

Intervalo	Clasificación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
67 a 118	A3 Zonas semiáridas	86,422.30	10.39
118 a 222	B2 Zonas áridas	484,271.76	58.22
222 a 500	A2 Zonas áridas	261,032.09	31.38



Stretta y Mosiño (1963) identificaron una subregión con categoría B2, donde se ubican los municipios de Mapimí, San Pedro del Gallo, Indé, San Juan de Guadalupe, Rodeo, Nazas y Cuencamé en el estado de Durango, además de otra región hacia el sur que fue clasificada con la categoría A3, considerada como la más árida de las zonas semiáridas, estos resultados concuerdan con lo obtenido para la subcuenca Río Medio Aguanaval empleando el índice de aridez de Emberger modificado por Stretta y Mosiño.

Pedroza Sandoval et al. (2014) identificaron las diferentes microrregiones de la zona centro-norte del estado de Durango, México, mediante el uso de mapas fisiográficos digitalizados y técnicas SIG; así como de índices de aridez e intensidad de sequía usando bases de datos históricos climatológicos de temperaturas máximas y mínimas y precipitación. Obtuvieron que, con base en el grado de aridez, existen tres grandes subregiones, la más árida (Categoría A2) y menos árida (Categoría B2) de las zonas áridas y la menos árida de las zonas semiáridas (Categoría B3). Estos resultados concuerdan con las zonas obtenidas para la subcuenca.

### **5.2.3. Índice de aridez De Martonne (1926)**

De acuerdo a los resultados, el índice de aridez De Martonne presentó valores de 8 hasta los 22, por esto se obtuvieron tres categorías (árido, semiárido y subhúmedo) (Figura 16, Cuadro 14). La primera categoría “árida” se distribuye al norte de la subcuenca, abarca casi toda la porción que corresponda al estado de Coahuila, representando el 31 % de la subcuenca, con excepción de una pequeña área. El intervalo para esta categoría va de 5 a 10. Esta clasificación coincide con los resultados obtenidos anteriormente en cuanto al área con menor registro de precipitación y mayores temperaturas.

La segunda categoría de 10 a 20, corresponde a la semiárida, la cual representa un poco más del 68 % de la superficie de la subcuenca. Se distribuye desde unas zonas excluidas de la categoría anterior (parte de Coahuila), gran parte de la porción correspondiente a Durango y la zona de Zacatecas.



Figura. 16. Distribución del índice De Martonne en la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la tercera categoría, con valores de 20 a 30, con un porcentaje mínimo de 0.21 (Cuadro 14), la categoría subhúmeda se presenta en la parte sur-sureste de la subcuenca, donde las precipitaciones medias registran valores superiores a los 500 mm y donde las condiciones permiten la agricultura de riego.

Cuadro 14. Clasificación del índice de aridez De Martonne en la subcuenca.

Intervalo	Clasificación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
5 a 10	Árido	260,328.77	31.30
10 a 20	Semiárido	569,565.80	68.49
20 a 30	Subhúmedo	1,727.72	0.21

Díaz-Padilla *et al.* (2011), elaboraron un mapa nacional con la delimitación espacial del índice de aridez (Figura 17), en el cual se muestra que la clase semiárida es la de mayor extensión en el país y en segundo lugar la clase árida. En dicho mapa se identificó el índice a nivel regional, el cual nos presenta una clasificación diferente, ya que, en los resultados de este estudio encontramos la categoría subhúmeda en la región sur de la subcuenca.



Figura. 17. Mapa nacional del índice de aridez De Martonne (Díaz-Padilla *et al.*, 2011).

Fuente: Díaz-Padilla *et al.* (2011).

Troyo Diéguez *et al.* (2014), concluyeron que el desempeño numérico del índice De Martonne está estrechamente asociado a la fluctuación de la precipitación, por lo que, en una serie de datos históricos, su sensibilidad obedece principalmente a las variaciones pluviométricas. Esto se pudo comprobar con el primer índice ya que se encontró una tercera categoría (subhúmeda) en la zona con registro de mayor precipitación.

### 5.3. Erosión hídrica y eólica laminar

#### 5.3.1. Índices

Para el período de crecimiento (PECRE) se obtuvo la distribución de los días máximos y mínimos, con disponibilidad de agua y con la temperatura favorable, requeridos para las condiciones naturales de la subcuenca (Figura 18). Esta distribución está relacionada con los rangos de precipitación y la climatología, ya que la zona con mayor precipitación (400 a 600 mm anuales) pertenece a la zona con valores más altos de PECRE, donde el uso de suelo y vegetación corresponden a pastizales y zonas agrícolas, principalmente.

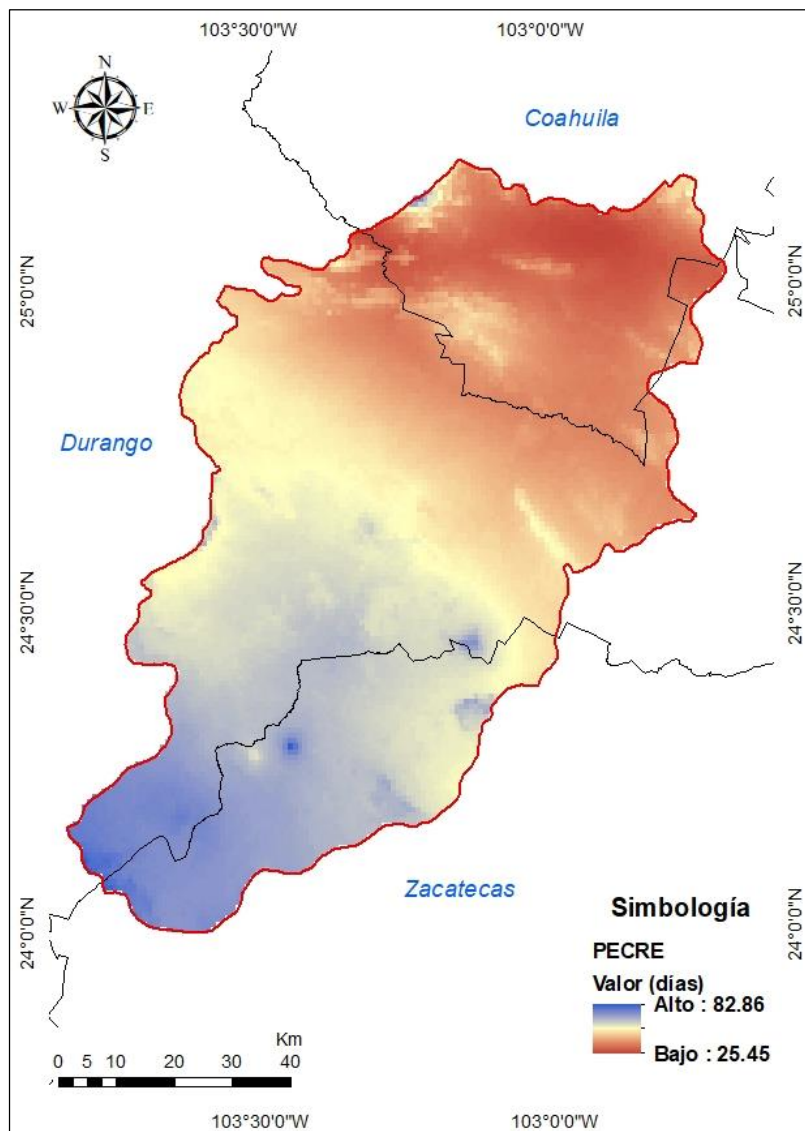


Figura. 18. Distribución del PECRE en la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19<sup>a</sup>, se muestran los valores de la agresividad de la lluvia (IALLU), que no son considerados tan altos, debido a que es una zona árida y semiárida y se toma en cuenta que la mayoría de los meses del año no hay presencia de lluvias en más del 50% de la zona. En la Figura 19b se muestran los valores del índice de agresividad del viento (IAVIE), se muestra que toda el área tiene influencia de erosión eólica laminar, ya que los valores obtenidos son superiores a 20, esto indica que son considerados altos.

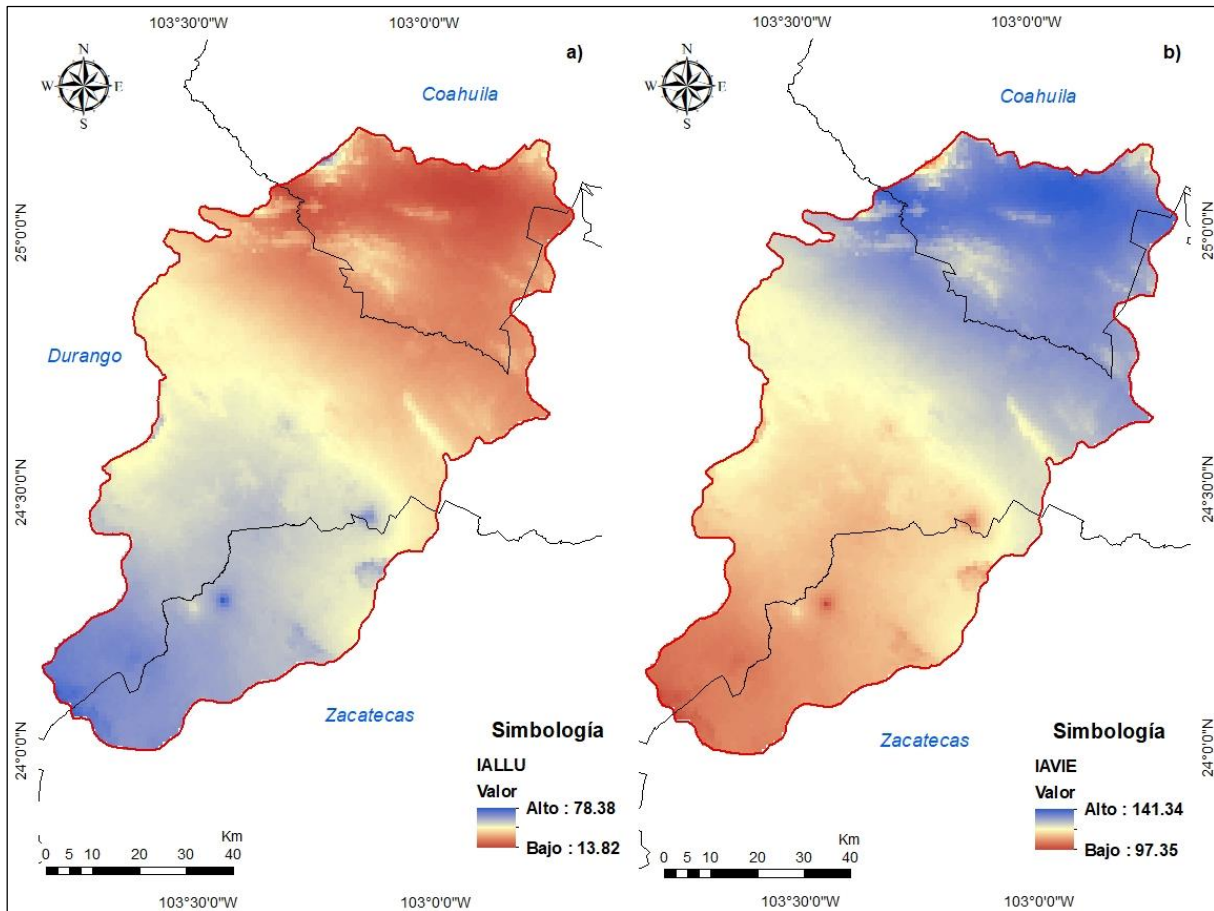


Figura. 19. Distribución del IALLU (a) y del IAVIE (b) en la subcuenca.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2. Calificadores para erosión hídrica laminar

El raster del calificador por erodabilidad (CAERO) muestra la dispersión de las unidades de suelo con base a su susceptibilidad a la erosión hídrica laminar, en mayor proporción, con un poco más del 49 % del valor de CAERO = 2 ya que los principales tipos de suelo son: Leptosol, suelo típico de zonas áridas, de capas delgadas y donde la vegetación

natural es escasa; el Chernozem, con profundidades de hasta 1 metro y muy fértil para la agricultura. Se distribuyen principalmente en la zona centro y norte (Figura 20a).

Con un 33.15 %, el valor de CAERO = 0.5 (Cuadro 15), representa la baja susceptibilidad a la erosión hídrica laminar, donde el tipo de suelo que predomina es el Phaeozem, además del Fluvisol, Regosol, Solonetz y Umbrisol. Por último, con un nivel de susceptibilidad medio (1), se representa el 17.75 % de la superficie de la subcuenca donde domina el tipo de suelo Regosol.

Cuadro 15. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAERO.

CAERO	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
0.5	274,612.33	33.15
1	147,021.23	17.75
2	407,024.29	49.10

Respecto al Calificador de textura y fase (CATEX), el 86 % (708,901.33 ha) de la superficie de la subcuenca tiene una textura media (clase 2), esta textura se encuentra prácticamente en toda la subcuenca. El 13 % de la superficie presenta textura fina y solo el 1 % de la superficie textura gruesa, distribuida hacia el sur, principalmente (Cuadro 16 y Figura 20b).

Cuadro 16. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATEX.

CATEX	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	CLASE	TEXTURA
0.20	9,124.92	1	1	Gruesa
0.30	708,901.33	86	2	Media
0.10	110,631.59	13	3	Fina

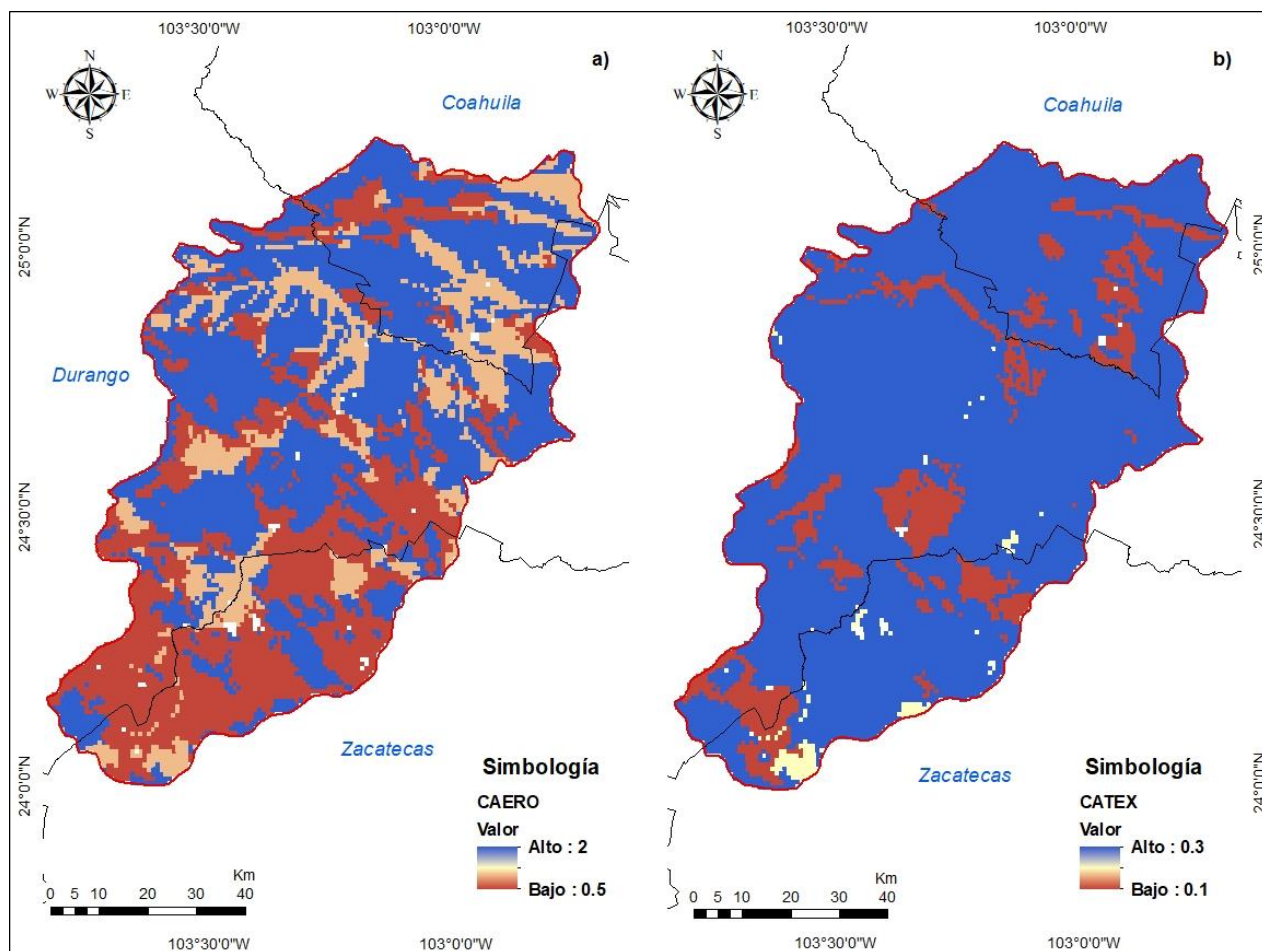


Figura. 20. Resultado de los calificadores CAERO (a) y CATEX (b) de la metodología SEDESOL-INE.

Fuente: Elaboración propia.

Con referencia al Calificador por topografía (CATOP), que se define con la pendiente y topoformas del área, la subcuenca, aproximadamente, en un 73 % presenta sierras y bajadas. Con un valor de 3.5, la topoforma corresponde a lomeríos y se encuentran en un 5.55 % de la superficie, presentes en las colindancias con el estado de Zacatecas (Cuadro 17 y Figura 21a).

Cuadro 17. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATOP.

CATOP	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Topografía
0.35	175,029.05	21.05	Llanura, valle, meseta
11	610,433.90	73.40	Bajada, Sierra
3.5	46,222.76	5.55	Lomerío

El Calificador por uso de suelo y vegetación nos indica que el matorral es el tipo de vegetación predominante en la subcuenca con un 56.06 % (Cuadro 18), esta área se encuentra con vegetación que protege al suelo del impacto de la lluvia, en contraste con el área agrícola (23.96 %), desprovista de flora a excepción de la época de siembra, siendo más susceptible a la erosión hídrica laminar (Figura 21b).

Cuadro 18. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAUSO.

CAUSO	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Uso de suelo y vegetación
0.10	14,407.39	1.74	Bosque
0.15	463,142.34	56.06	Matorral
0.12	150,632.11	18.23	Pastizal
0.80	197991.66	23.96	Agrícola

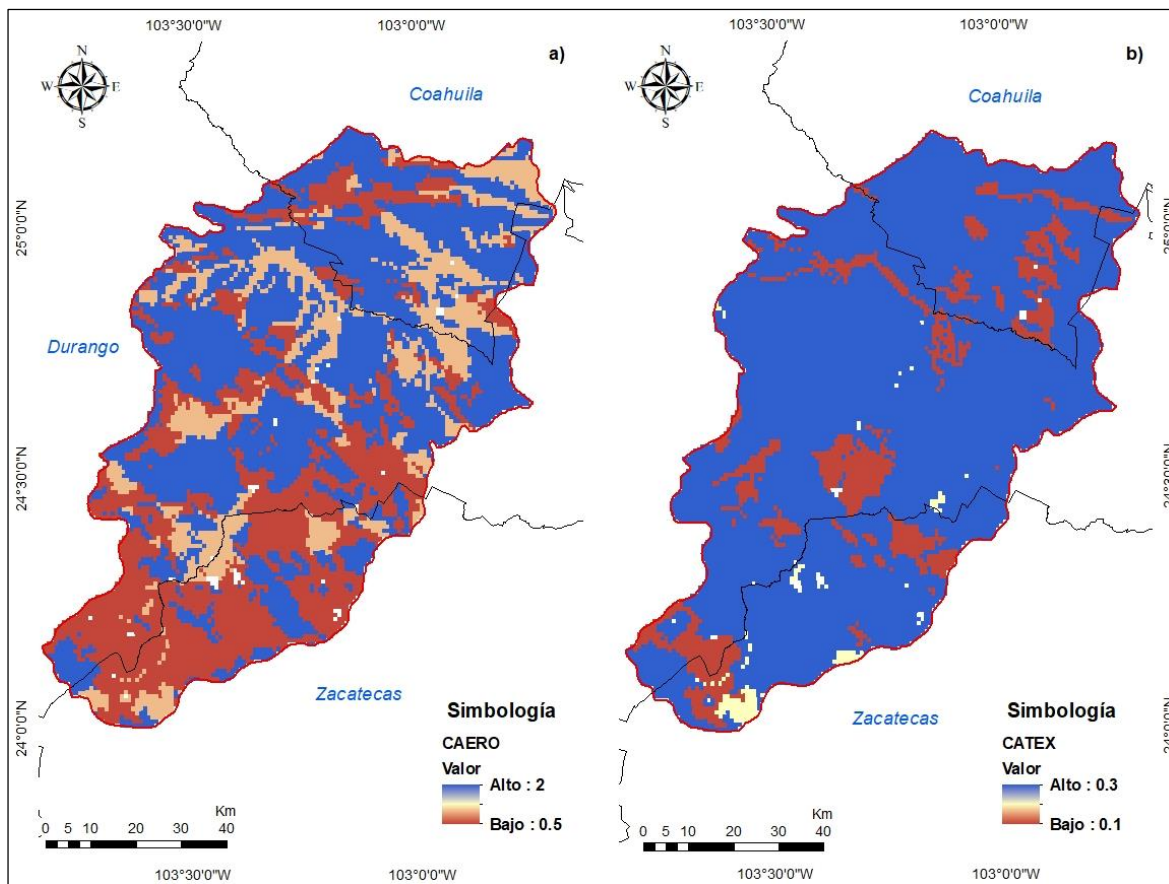


Figura. 21. Resultado de los calificadores CATOP (a) y CAUSO (b) de la metodología SEDESOL-INE.

Fuente: Elaboración propia.



### 5.3.3. Erosión hídrica laminar

Los resultados de la integración de cada uno de los calificadores (CAERO, CATEX, CATOP y CAUSO) además del IALLU, para obtener la erosión hídrica laminar del suelo y su distribución, se presentan en la Figura 22, donde se obtuvieron áreas sin degradación aparente hasta el dato máximo de  $364 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La subcuenca presenta los cuatro niveles de erosión hídrica laminar que establece la metodología, relacionándola directamente con los niveles de degradación que van de ligera a muy alta (Cuadro 19).

Cuadro 19. Erosión hídrica laminar en la subcuenca.

Zona	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Grado de erosión	Nivel de degradación
1	278,200.37	33	Menor de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	ligera
2	423,612.39	52	De $10 \text{ a } 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	moderada
3	107,860.57	13	De $50 \text{ a } 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	alta
4	15,180.38	2	Mayor a $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	muy alta

El nivel de degradación con mayor presencia es el nivel moderado con un 52 % ( $423,612.39 \text{ ha}$ ), su distribución se relaciona con el tipo de vegetación de matorral, ligado también con la topografía del terreno, que ayuda a la remoción de las capas de suelo. Los resultados muestran valores superiores a las  $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , en un 2 % de la superficie, ubicada justamente en la zona sur de Durango y norte de Zacatecas, zona agrícola, con un nivel de erosionabilidad alto (CAERO = 2) y con variaciones en altitud. Estos datos difieren de los obtenidos por Gaitán *et al.* (2017) con una tasa media de erosión hídrica laminar, para la República Argentina, de  $6.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). También difieren de los datos conseguidos por Castro Mendoza (2013), que obtuvo la erosión actual de la microcuenca de la presa Madín, ubicada en el Estado de México, en la cual se considera como incipiente ( $7.58 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

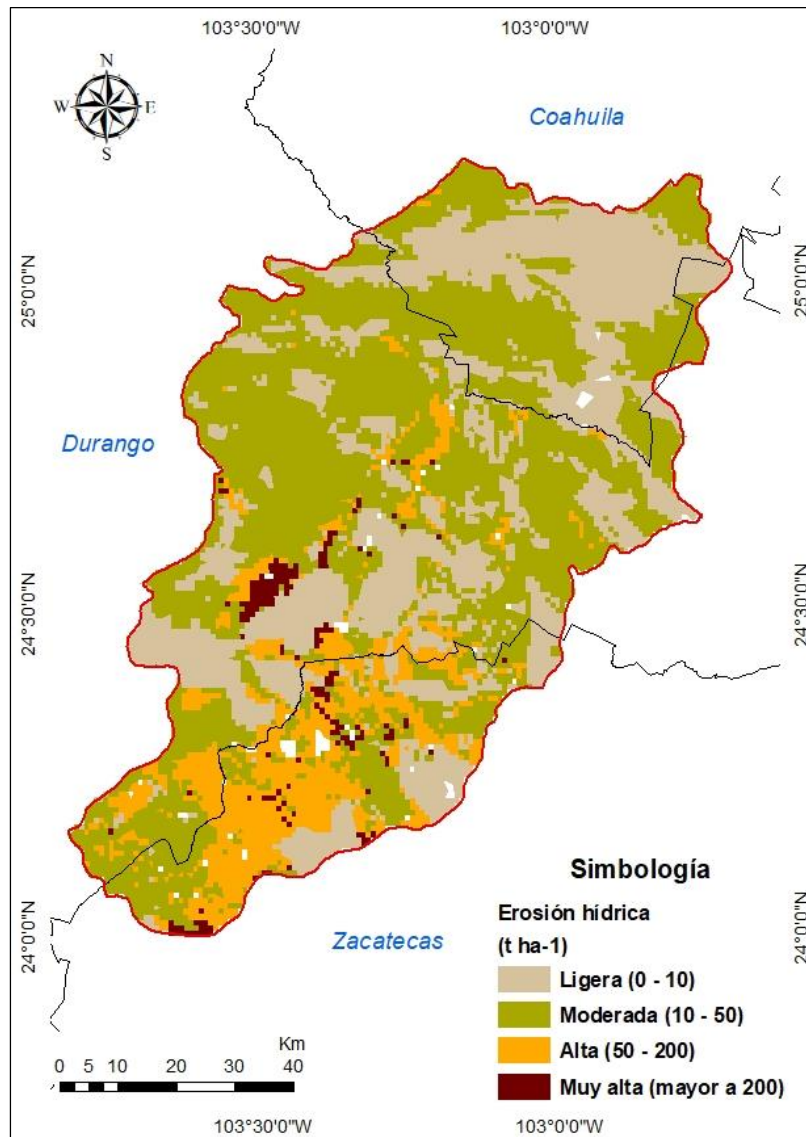


Figura. 22. Distribución de la erosión hídrica laminar en la SRMA.

Fuente: Elaboración propia.

El resultado obtenido para la subcuenca concuerda con los obtenidos por SEMARNAT (2012), que cuantificó las cifras para todo el territorio mexicano, establecieron intervalos de valores desde  $1.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  hasta valores muy altos de  $471.0 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . López Santos *et al.* (2012), evaluaron el grado de vulnerabilidad de los sistemas naturales y agroproductivos de Durango, fue calculada mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) calibrada para México, obtuvieron un promedio de  $163.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de pérdida de suelo. Aunque en sus elementos de salida (raster) identifican las zonas con mayor erosión al oeste del Estado.

Los resultados obtenidos en este trabajo presentan similitudes con los conseguidos por Vásquez y Tapia, (2011), para la sierra peruana, en 22 microcuencas. La región corresponde a zonas semiáridas con topografía muy accidentada y una precipitación de 300 a 1,200 mm año<sup>-1</sup>, los valores fueron de 45.04 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en este estudio más del 50 % corresponde a una pérdida de entre 10 a 50 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, con un nivel moderado de erosión hídrica laminar.

#### 5.3.4. Erosión eólica laminar

Respecto al calificador de textura y fase (CATEX), el 81.05 % (671,9595.18 ha) de la superficie de la subcuenca tiene una textura media (clase 2), esta textura se encuentra prácticamente en toda la subcuenca. Resultando las dos clases restantes (1 y 3) con apenas el 19 % de distribución en conjunto, en la subcuenca (Cuadro 20 y Figura 23a).

Cuadro 20. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CATEX.

CLASE	TEXTURA	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE (%)
1	Gruesa	105,714.95	12.76
2	Media	671,595.18	81.05
3	Fina	51,347.72	6.20

Los resultados del calificador por uso de suelo y vegetación (CAUSO) indican que el monte o matorral es el tipo de vegetación predominante en la subcuenca con un 56.86 %, con casi 24 % los dos tipos de agricultura están presentes siendo la de temporal la de mayor distribución (Cuadro 21 y Figura 23b).

Cuadro 21. Distribución de las superficies de acuerdo al valor de CAUSO.

CAUSO	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Uso de suelo y vegetación
0.7	169620.66	20.53	Agricultura de Temporal
0.2	28370.99	3.43	Agricultura de Riego
0.15	469736.29	56.86	Monte o Matorral
0.3	150632.11	18.23	Pastizal

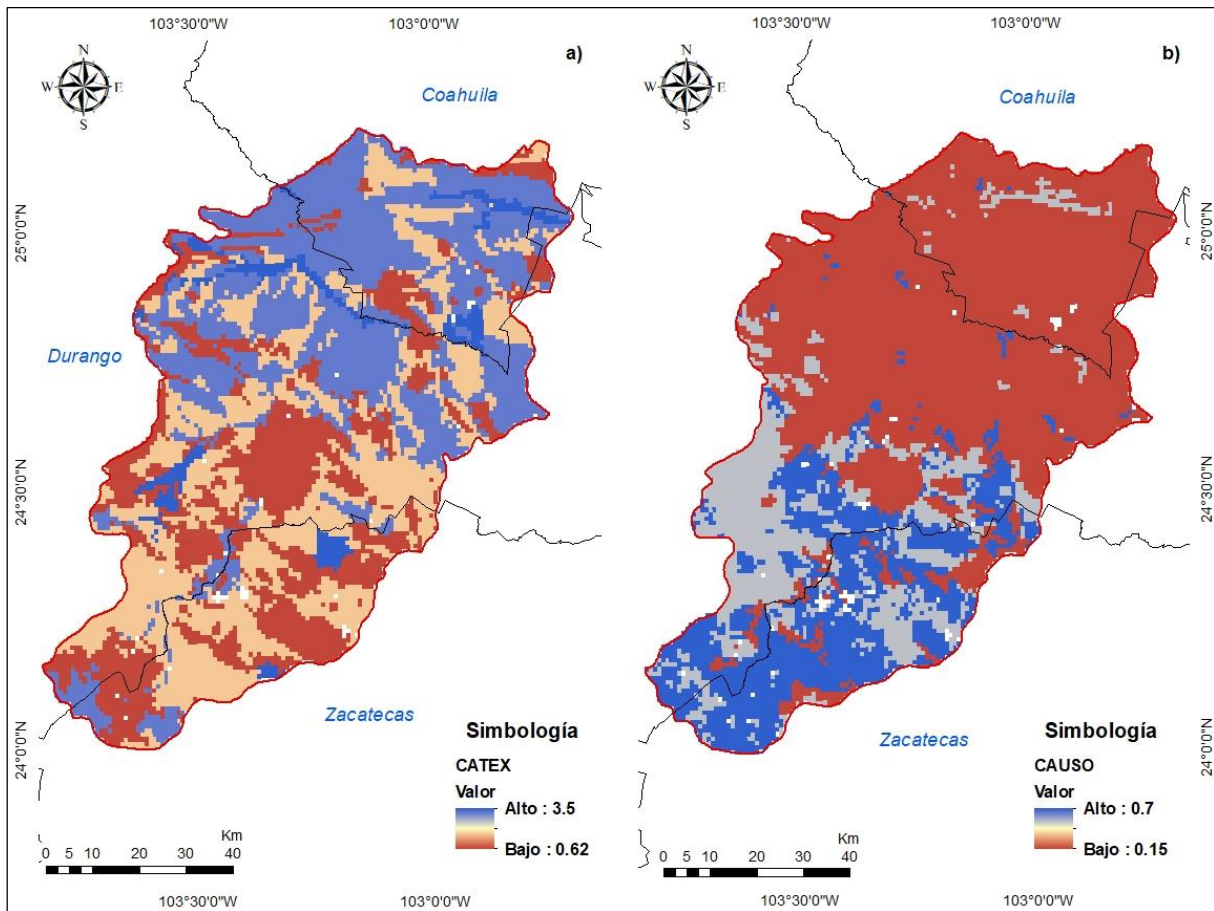


Figura. 23. Resultado de los calificadores CATEX (a) y CAUSO (b) de la metodología SEDESOL-INE.

Fuente: Elaboración propia.

La erosión eólica laminar en la subcuenca se obtuvo de la integración de cada uno de los calificadores (CATEX y CAUSO) además del IAVIE (Figura 24). Se obtuvieron áreas sin degradación aparente hasta el valor máximo de  $290 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

Los cinco rangos de clasificación de erosión eólica laminar están presentes en la subcuenca con niveles de degradación desde muy alta hasta sin erosión aparente (Cuadro 22). Con menos del 1 % se encontraron áreas sin erosión, así como zonas con rangos de  $100 \text{ a } 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  con un poco más del 5 %. El nivel de degradación ligera es el que más se distribuye con un 67.57 % de la subcuenca. Los últimos dos niveles de degradación (moderada y muy alta) se distribuyen con menos del 15 % cada uno.

Cuadro 22. Erosión eólica laminar en la subcuenca.

Zona	Rangos	Nivel de degradación	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
1	Menor de 12 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Sin erosión	1,452.58	0.18
2	De 12 a 50 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Ligera	550,959.34	67.57
3	De 50 a 100 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Moderada	119,057.52	14.60
4	De 100 a 200 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Alta	42,286.70	5.19
5	Mayor a 200 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Muy alta	101,593.24	12.46

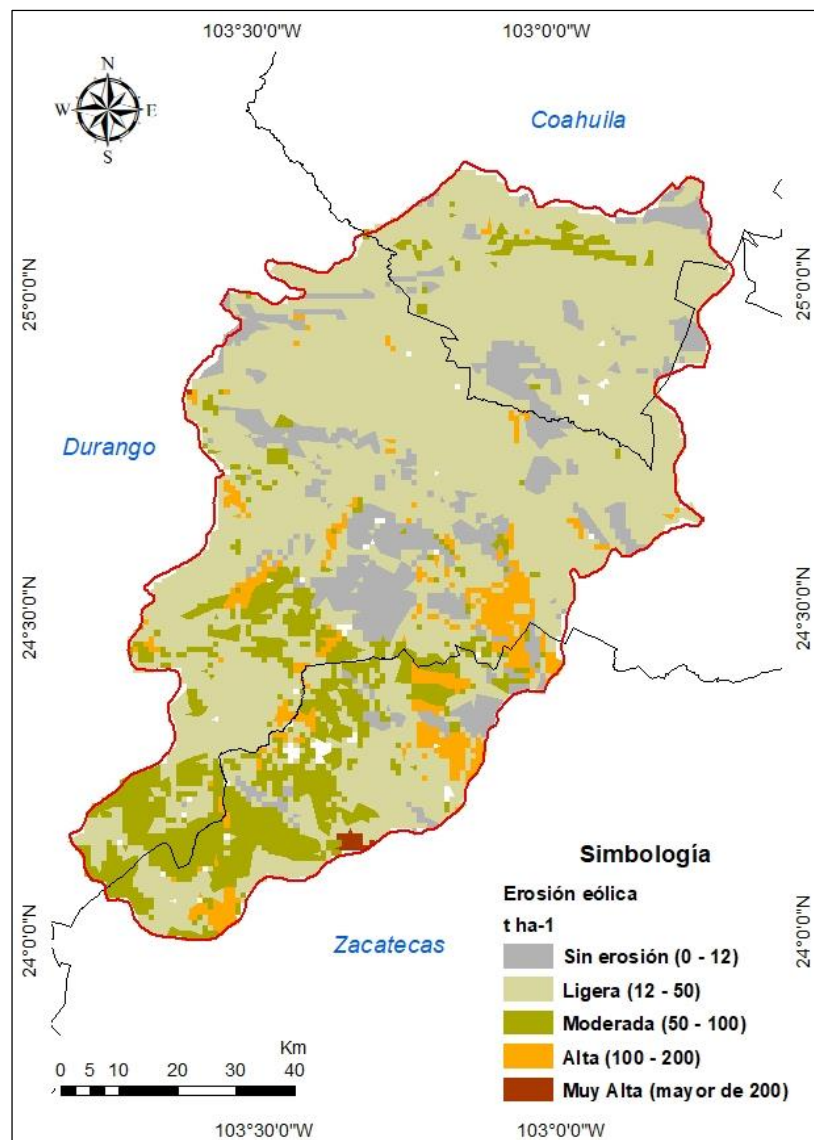


Figura. 24. Distribución de la erosión eólica laminar en la SRMA.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. Cambios en la Cubierta Vegetal

Para el indicador de cambios en cubierta vegetal se emplearon la serie II y la serie VI de uso de suelo y vegetación (USyV) para su comparación basada en la homologación realizada previamente. La clasificación final se presenta en el Cuadro 23 además las superficies correspondientes a cada una.

Se encontraron tres puntos de importancia, referidos a las clases de matorral submontano, pastizal cultivado (agricultura de temporal anual) y el pastizal natural. Respecto al primer uso de suelo y vegetación, matorral submontano, fue el que menos cambió en superficie (-0.01 %). En cuanto al aumento en superficie, la agricultura de temporal anual pasó de 15 a más del 20 % de la superficie de la subcuenca y el pastizal natural fue la cobertura más vulnerable, ya que disminuyó en el mismo periodo más de 370 km<sup>2</sup>.

Fue posible obtener las tasas de cambio para el periodo 1993 – 2014 considerando la superficie de cada una de las coberturas.

Cuadro 23. Clasificación de las series de USV.

No.	S II	S VI	Sup_km <sup>2</sup> _SII	Sup_km <sup>2</sup> _SVI	Cambio (1993-2014) (km <sup>2</sup> )	Sup_% _SII	Sup_% _SVI	Tasa de cambio (%)
1	Arenosos/Sin vegetación aparente	Arenosos/Sin vegetación aparente	1.24	0.59	-0.65	0.015	0.007	3.47
2	Bosque de pino	Bosque de pino	76.81	78.13	1.32	0.924	0.939	-0.08
3	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	12.11	15.83	3.72	0.146	0.190	-1.28
4	Matorral crasicaule	Matorral crasicaule	479.05	468.83	-10.22	5.760	5.637	0.10
5	Matorral desértico micrófilo	Matorral desértico micrófilo	2114.68	2098.52	-16.16	25.426	25.232	0.04
6	Matorral desértico rosétofilo	Matorral desértico rosétofilo	2097.11	2043.83	-53.28	25.215	24.575	0.12
7	Matorral submontano	Matorral submontano	16.74	16.73	-0.01*	0.201	0.201	0.00
8	Mezquital	Mezquital	74.35	67.01	-7.33	0.894	0.806	0.49
9	Pastizal Cultivado- Agric. de Temp. Anual	Pastizal Cultivado- Agric. de Temp. Anual	1319.11	1696.21	377.1*	15.861	20.395	-1.20
10	Pastizal halófilo	Pastizal halófilo	0.35	0.45	0.09	0.004	0.005	-1.14

11	Pastizal inducido	Pastizal inducido	31.93	39.65	7.72	0.384	0.477	-1.04
12	Pastizal Inducido, Agric. de Riego Anual	Pastizal Inducido, Agric. de Riego Anual	233.03	283.71	50.68	2.802	3.411	-0.94
13	Pastizal natural	Pastizal natural	1842.18	1466.23	-375.95*	22.150	17.630	1.08
14	-	Vegetación halófila	-	1.83	1.83	-	0.022	-
15	Zona urbana	Zona urbana	18.16	39.29	21.13	0.218	0.472	-3.74

La Figura 25 muestra la distribución de cada uno de los usos de suelo y vegetación para cada una de las series. En el Cuadro 24 se muestra la matriz de transición de la serie II y la serie VI de uso de suelo y vegetación del INEGI. Representa los usos de suelo que cambiaron de categoría.

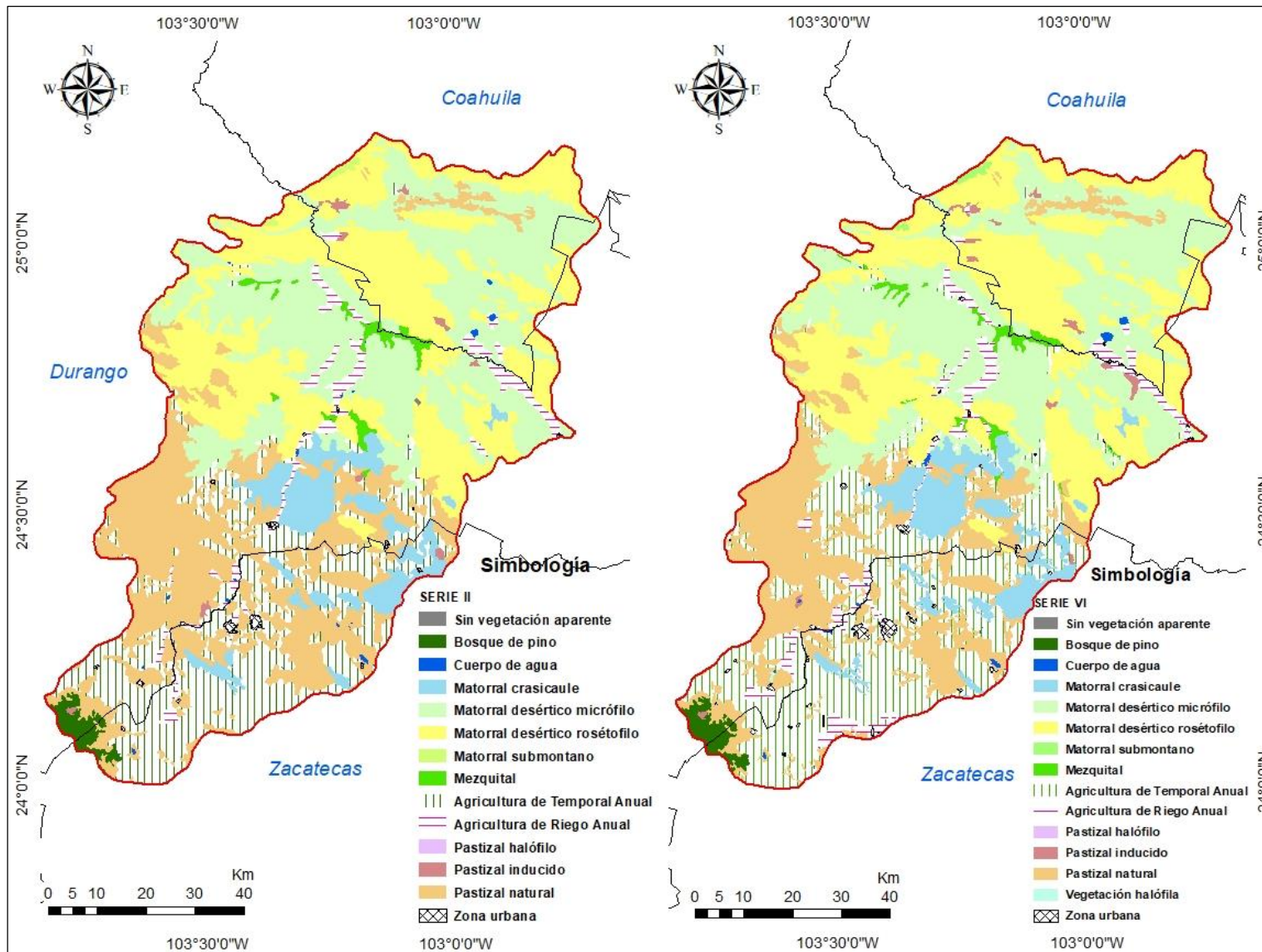


Figura. 25. Cambios en la cubierta vegetal en el periodo (1993 – 2014).

Fuente: Elaboración propia.



Cuadro 24. Matriz de transición para las series de USV II y VI (1993 – 2014).

		2014														
SERIE II / SERIE VI		DV	BP	H <sub>2</sub> O	MC	MDM	MDR	MSM	MK	TA	PH	PI	RA	PN	VH	AH
1993	Arenosos/ Sin veg. aparente	0	0	0	0	0.39	0.73	0	0	0	0	114.63	8.12	0	0	0
	Bosque de pino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.33	158.37	46.92	0	0
	Cuerpo de agua	0	0	973.95	0	53.30	0.04	0	10.52	63.73	0	0.21	8.38	17.92	82.91	0.16
	Matorral crasicale	0	0	23.10	42338.50	83.48	29.17	0	15.02	5098.60	0	1.08	0.32	251.75	0	64.23
	Mat. desértico micrófilo	0	0	207.62	396.04	196499.93	5195.30	0	877.39	3880.80	20.84	365.05	2864.60	1011.80	0.72	148.04
	Mat. Desértico rosétófilo	0	0	3.98	80.23	8722.34	196861	6.40	666.77	1212.80	0	602.07	782.30	754.41	0	18.63
	Mat. submontano	0	0	0	0	0	7.41	1667	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mezquital	0	0	0	259.09	797.49	459.16	0	4693.20	872.21	0	0	353.59	0	0	0
	Pastizal Cultivado- Agric. de Temp. Anual	0	0.04	105.59	1495.78	568.29	473.82	0	11.79	114623	0	221.40	7269.6	6342.2	25.28	774.24
	Pastizal halófilo	0	0	0	0	11.41	0	0	0	0	23.71	0	0	0	0	0
	Pastizal inducido	0	2.15	0	6.67	44.26	299.94	0	0	306.01	0	1898	501.61	134.56	0	0
	Pastizal Inducido- Agric. de Riego Anual	59.04	0	200.44	396.55	2576.55	418.28	0	273.51	2401.50	0	759.42	15110	727.44	0	380.27
	Pastizal natural	0	337.48	68.19	1909.84	494.94	638.38	0	153.20	40987	0	0.71	1366.60	137334	74.53	853.09
Zona urbana	0	0	0	0.64	0.09	0	0	0	0	17.36	0	0	105.86	1.80	0	1690.69

Unidades: (km<sup>2</sup>).

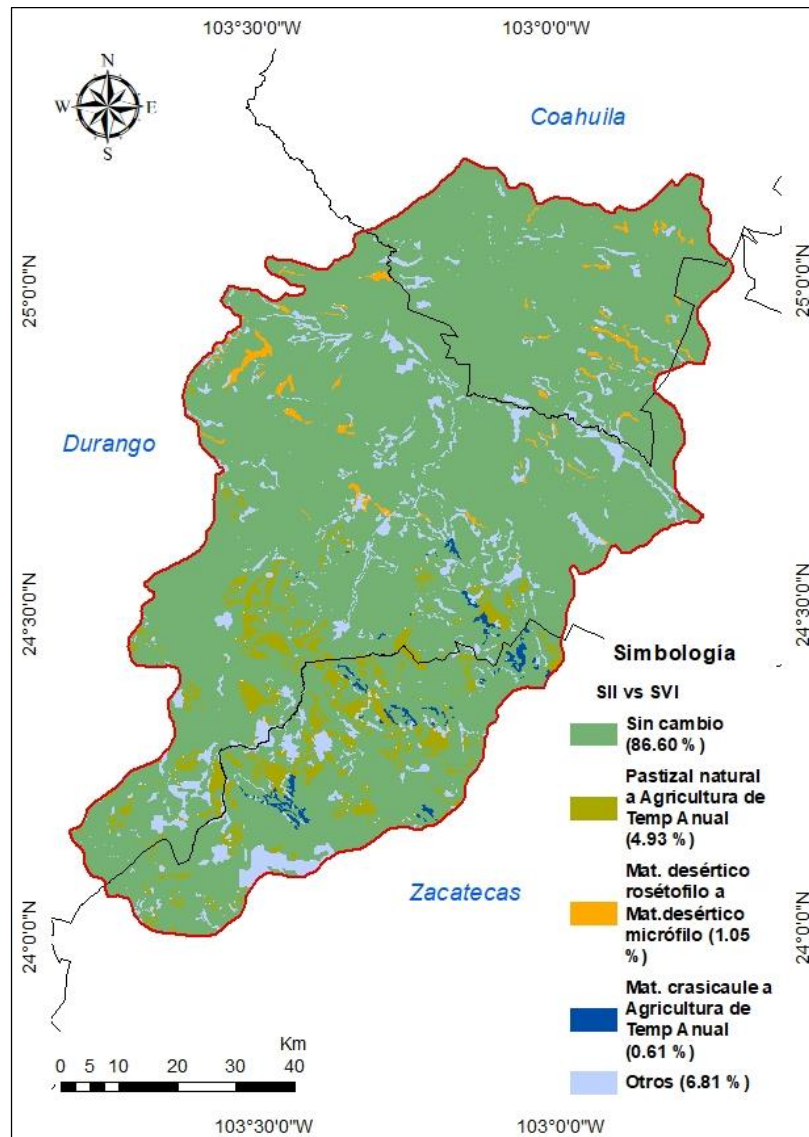


Figura. 26. Cambios generales entre Serie II y Serie VI de USV.

## 5.5. Productividad primaria neta (PPN)

### 5.5.1. Clasificación supervisada

Para el segundo indicador, productividad primaria neta que se evalúa a través del índice de vegetación NDVI, se trabajó con imágenes de satélite de 1990, 2001, 2010 y 2018, debido a la calidad y disposición de las escenas requeridas para la subcuenca (path: 29 y 30, row: 043). Se trabajó con referencia dos temporadas en el año, una anterior y otra posterior a la época de lluvia, considerando marzo y abril como temporada anterior y octubre como posterior a las lluvias. Para la época de seca se consideró un periodo de 28 años y 17 años para la época húmeda.

Se aplicaron los procesos de corrección radiométrica y corrección atmosférica, para ajustar y mejorar los valores radiométricos y la calidad de las imágenes de satélite.

Mediante el software libre QGIS 2.6.1 se obtuvo la clasificación supervisada a través de su clasificador de máxima probabilidad o máxima verosimilitud, con la cual se establecieron cinco clases o áreas de entrenamiento: vegetación, cuerpos de agua, cultivos, suelos y zona construida. El Cuadro 25 muestra la distribución de las clases para la época seca en la subcuenca. Se observa que la categoría de construcción fue la que presentó un aumento constante, pasando de 0.28 % a 0.58 %. Para la clasificación de 1990 y 2018 los valores obtenidos son muy similares, en contraste con lo obtenido en 2010 donde se observa una disminución en la categoría de vegetación y un aumento en la superficie de suelo.

Cuadro 25. Clasificación supervisada para la época seca (1990 – 2018).

<b>Mes</b>	<b>Año</b>	<b>Categoría</b>	<b>Superficie km<sup>2</sup></b>	<b>Porcentaje</b>
Abril	1990	Vegetación	5966.79	71.53
		Cuerpos de agua	16.92	0.20
		Cultivos	1030.63	12.36
		Suelo	1304.27	15.64
		Construcción	23.00	0.28
Marzo	2010	Vegetación	5453.99	65.30
		Cuerpos de agua	18.94	0.23
		Cultivos	940.22	11.26
		Suelo	1903.21	22.79
		Construcción	36.00	0.43
Abril	2018	Vegetación	6050.81	72.34
		Cuerpos de agua	33.31	0.40
		Cultivos	936.48	11.20
		Suelo	1295.68	15.49
		Construcción	48.49	0.58

La Figura 27 representa la comparación entre las tres clasificaciones para la época seca. En cuanto a la clasificación para la época húmeda se registró un aumento para el año 2018 en la clase de cuerpos de agua, pasando de 0.09 % en 2001 a 0.24 % en 2018

(Cuadro 26). Para la categoría de vegetación se presenta una fluctuación, ya que inicio con 48 % de la superficie, aproximadamente, registrando un aumento a más del 60 % en 2010, para volver a disminuir en 2018 en poco más del 12 %. De forma gráfica se pueden observar los cambios en la Figura 28.

Cuadro 26. Clasificación supervisada para la época húmeda (2001 – 2018).

<b>Mes</b>	<b>Año</b>	<b>Categoría</b>	<b>Superficie km<sup>2</sup></b>	<b>Porcentaje</b>
Octubre	2001	Vegetación	4007.64	48.01
		Cuerpos de agua	7.76	0.09
		Cultivos	2970.21	35.58
		Suelo	1330.64	15.94
		Construcción	31.00	0.37
Octubre	2010	Vegetación	5220.64	62.51
		Cuerpos de agua	7.86	0.09
		Cultivos	2256.44	27.02
		Suelo	831.40	9.95
		Construcción	36.00	0.43
Octubre	2018	Vegetación	4174.94	49.91
		Cuerpos de agua	20.27	0.24
		Cultivos	2455.58	29.36
		Suelo	1665.43	19.91
		Construcción	48.49	0.58

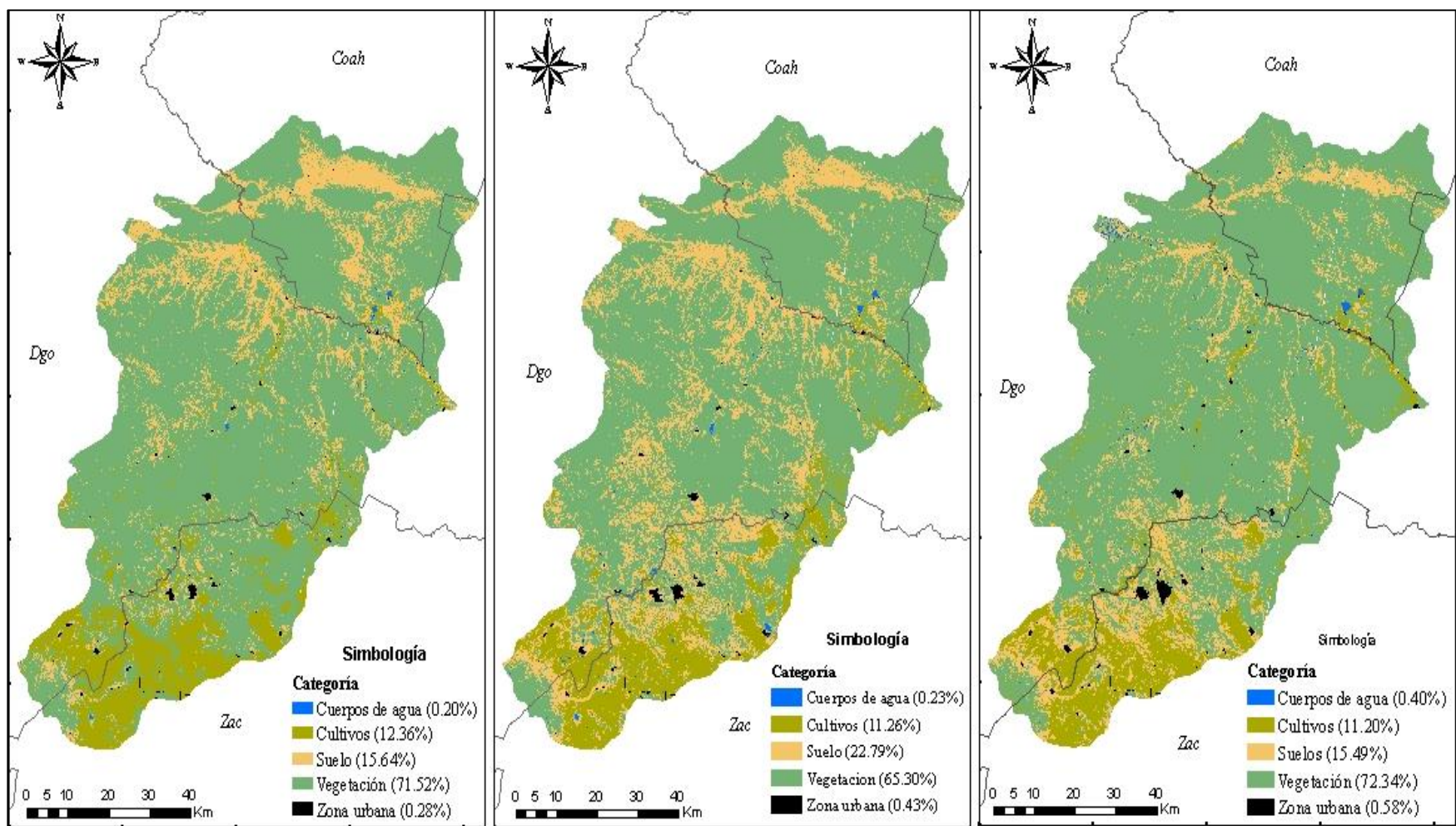


Figura. 27. Clasificación supervisada para la época seca (1990 – 2018).

Fuente: Elaboración propia.

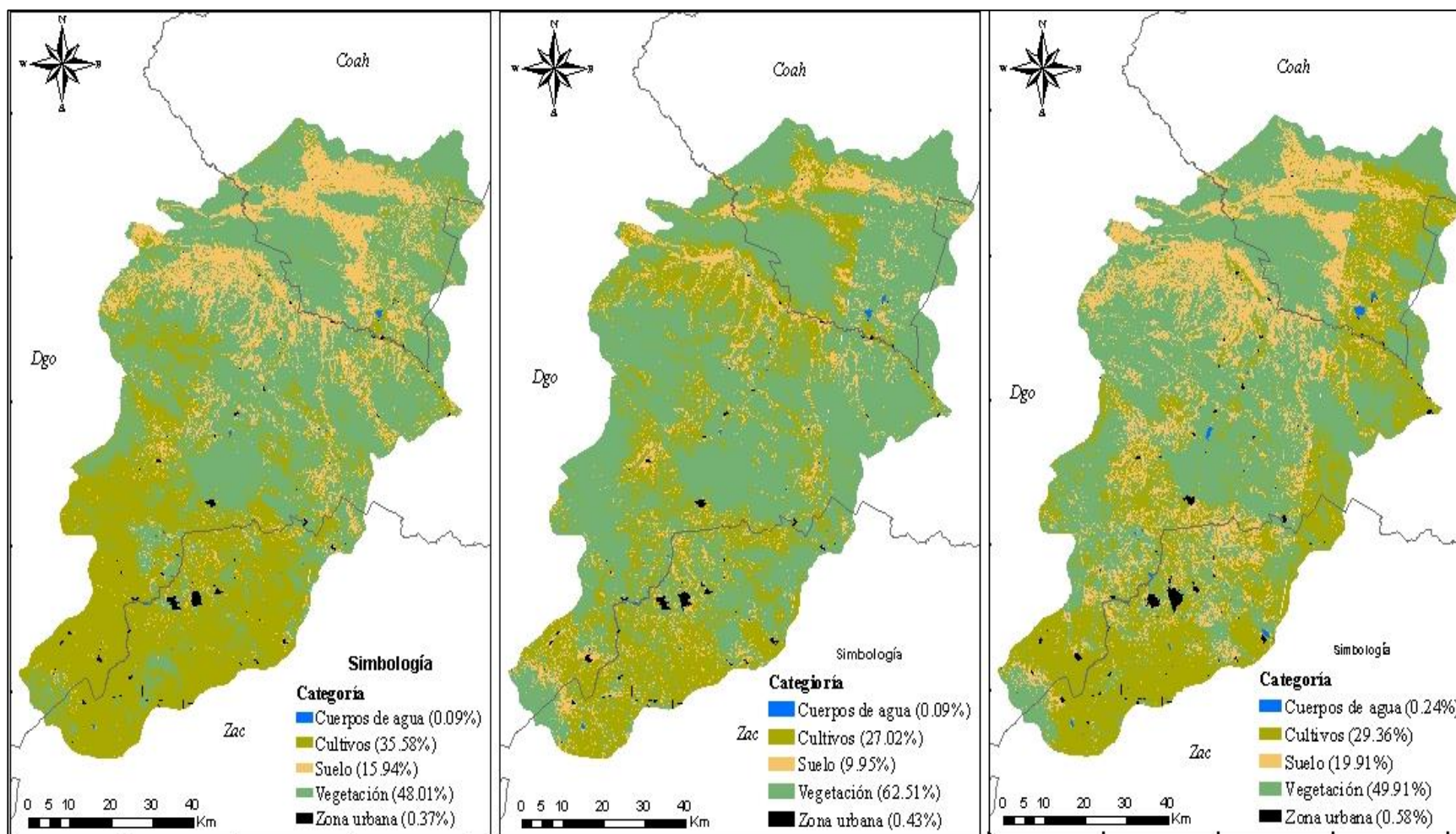


Figura. 28. Clasificación supervisada para la época húmeda (2001 – 2018).

Fuente: Elaboración propia.

### 5.5.2. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI obtenido para la época de seca, de acuerdo con la Figura 29 y el Cuadro 27, la superficie que corresponde a vegetación presenta un aumento en el año 2010 y una disminución para el 2018.

Cuadro 27. NDVI para la época seca.

<b>Mes</b>	<b>Año</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Categoría</b>
Abril	1990	-0.00149	0.32703	Vegetación Suelo
Marzo	2010	-0.00074	0.20618	Vegetación Suelo
Abril	2018	-0.00073	0.30835	Vegetación Suelo

Para la época húmeda (Figura 30 y el Cuadro 28), la superficie que corresponde a vegetación presenta una disminución considerable hacia el año 2018.

Cuadro 28. NDVI para la época húmeda.

<b>Mes</b>	<b>Año</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Categoría</b>
Octubre	2001	-0.00182	0.46388	Vegetación Suelo
Octubre	2010	-0.00035	0.32674	Vegetación Suelo
Octubre	2018	-0.00096	0.66066	Vegetación Suelo

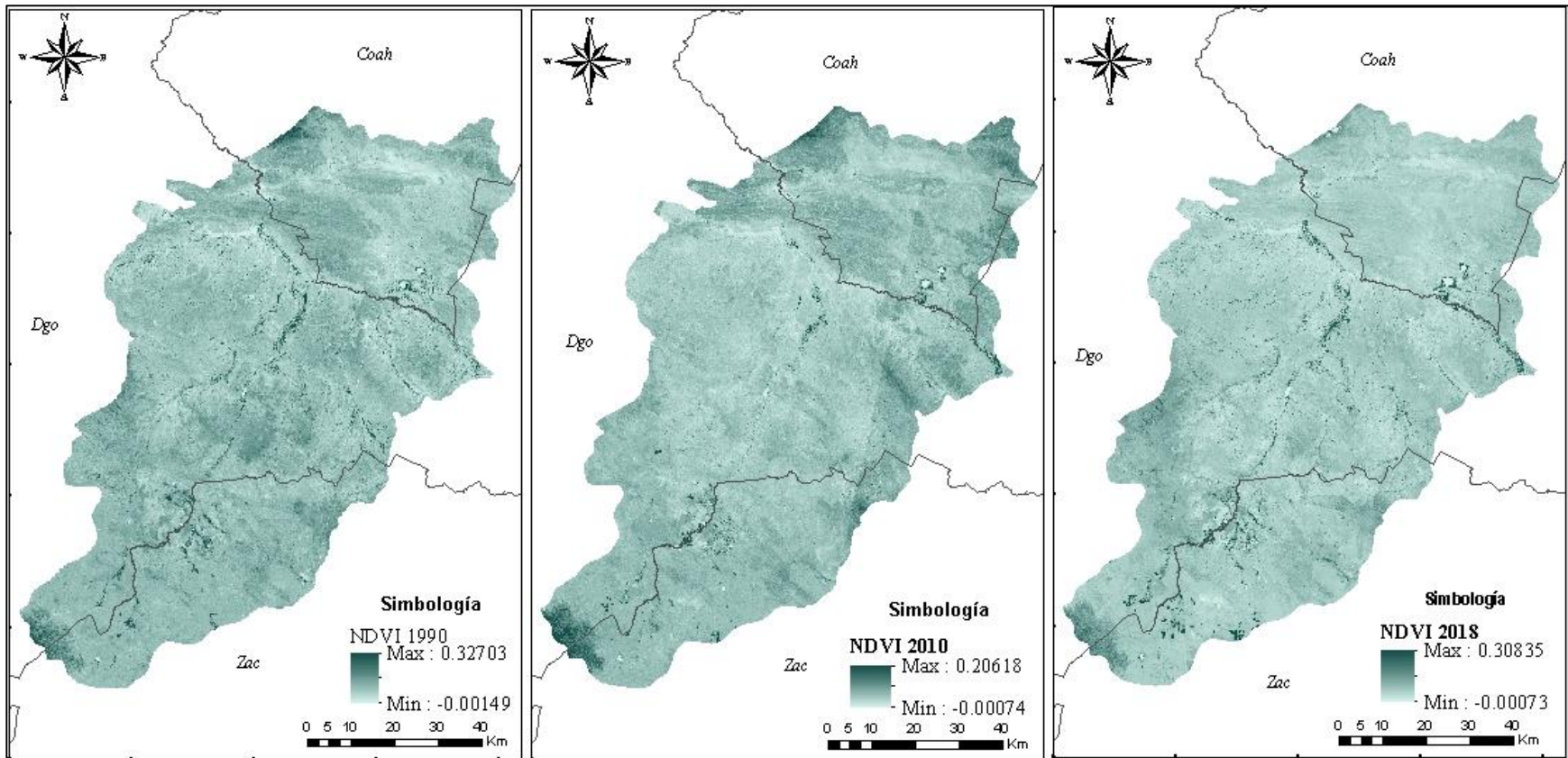


Figura. 29. NDVI para la época seca.

Fuente: Elaboración propia.



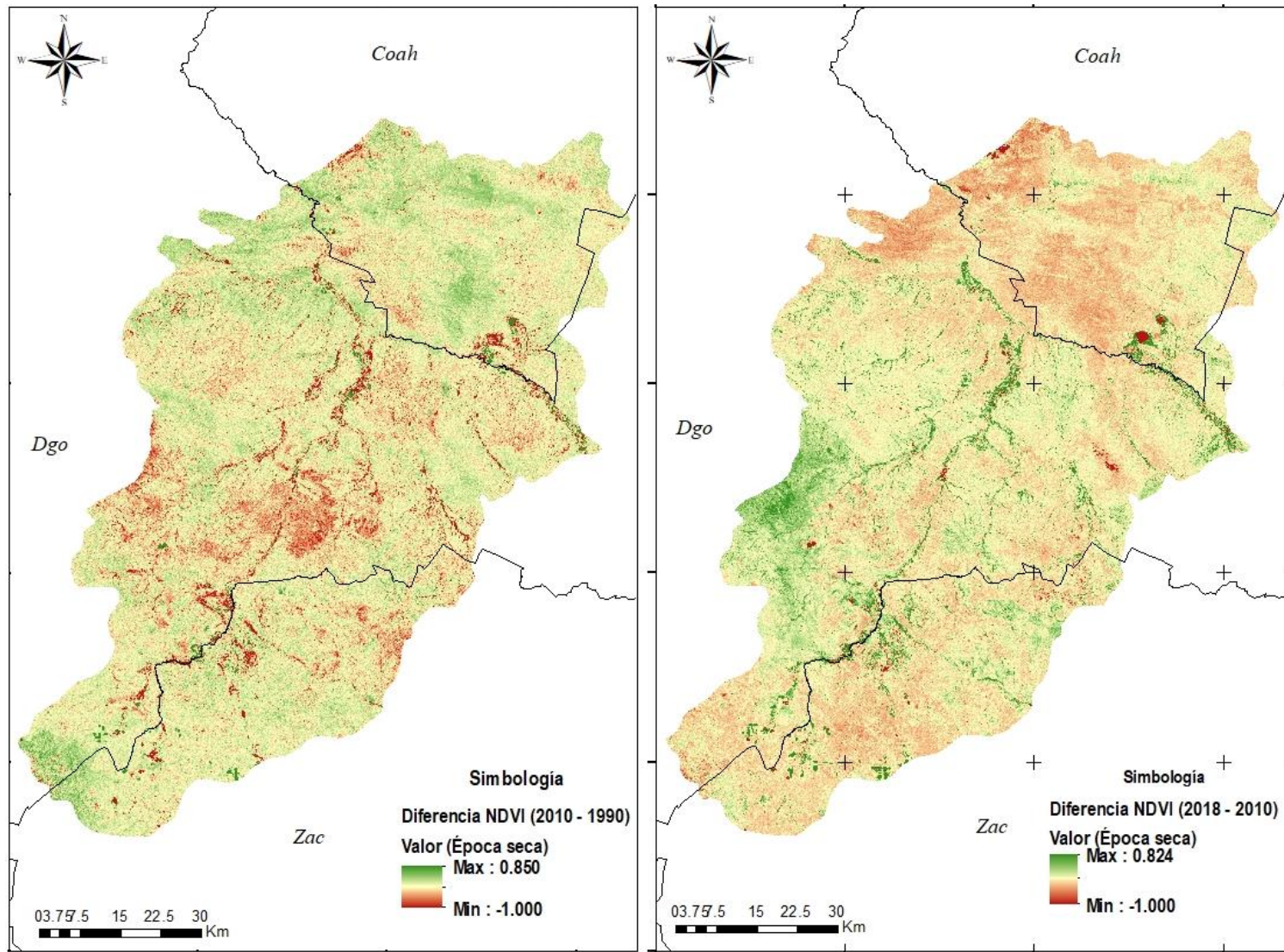


Figura. 30. Diferencia de NDVI de época seca (2018-2010) y (2010-1990).

Fuente: Elaboración propia.

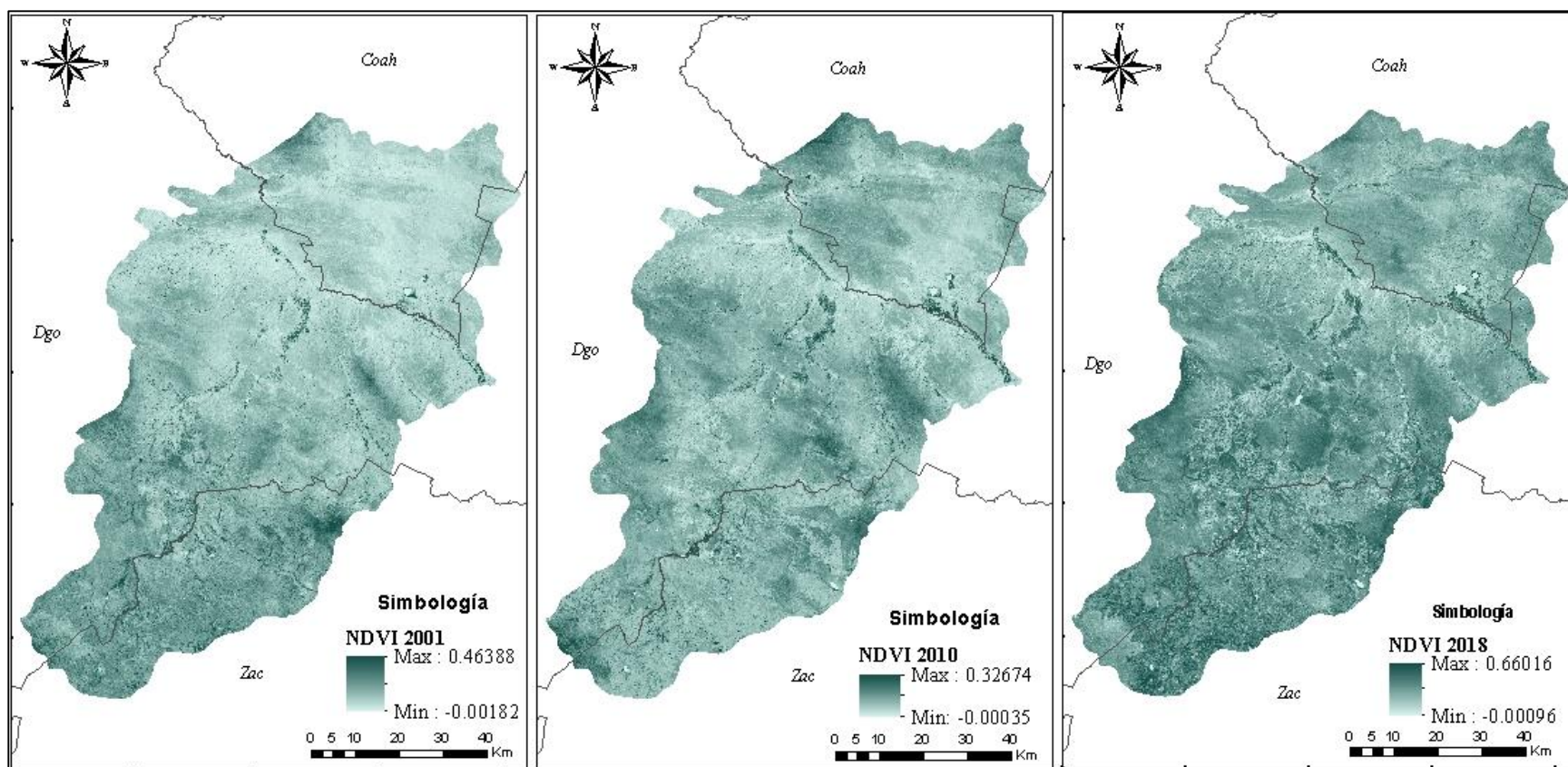


Figura. 31. NDVI para la época húmeda.

Fuente: Elaboración propia.

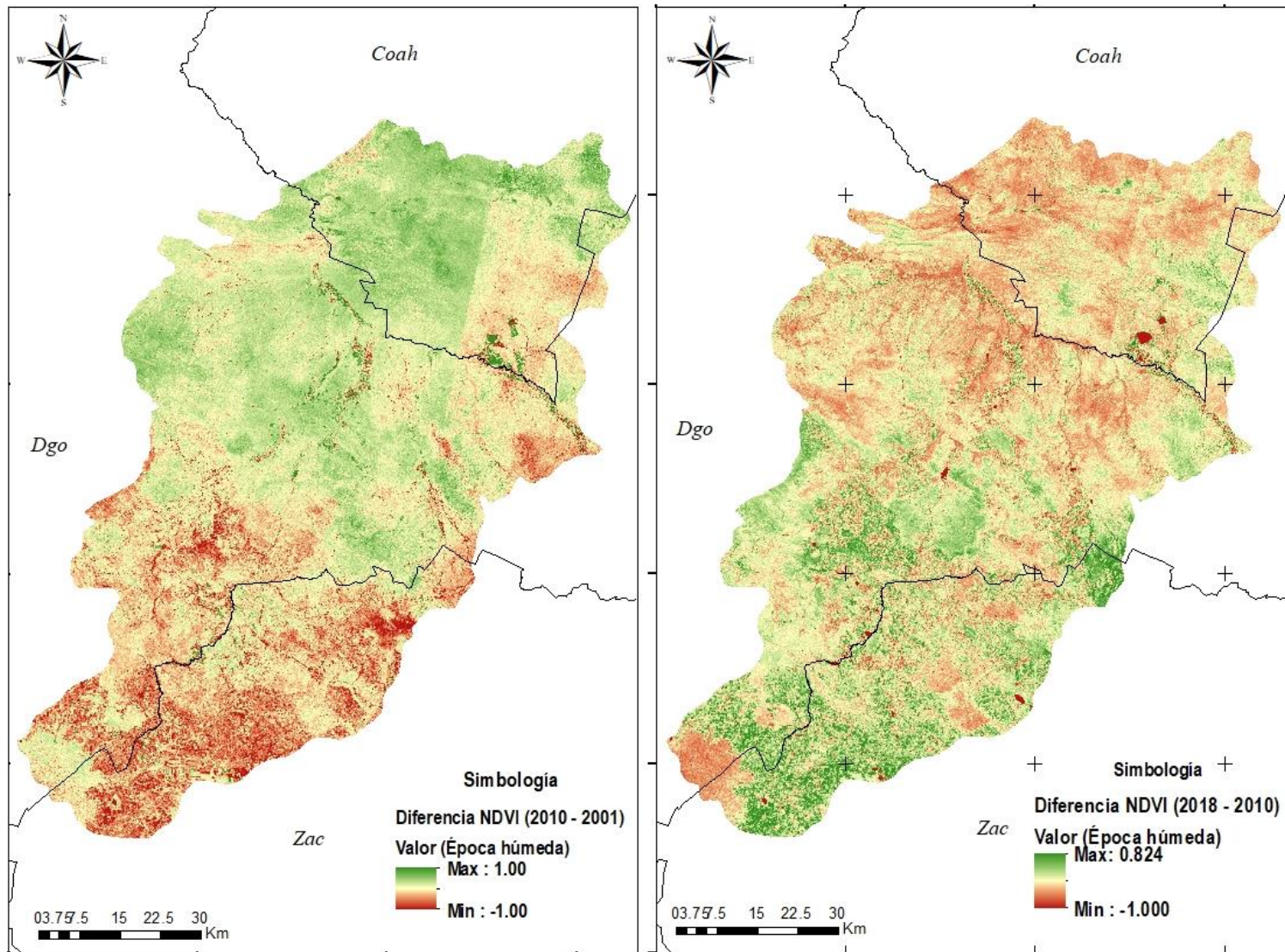


Figura. 32. Diferencia de NDVI de época húmeda (2018-2010) y (2010-2001).

Fuente: Elaboración propia.

La relación entre la precipitación y el NDVI se ha investigado extensamente (Nicholson y Farrar, 1994; Grist et al., 1997), de manera particular en ambientes semiáridos y áridos. Dado que la oferta de agua es uno de los principales controles ambientales en la determinación de la productividad primaria, es razonable asumir una relación indirecta entre la precipitación y el NDVI, por la cual los datos de NDVI se suelen utilizar como sucedáneos de la vegetación para mostrar su interrelación con la precipitación (Hielkema et al., 1986) o, por el contrario, para estimar la precipitación en un área donde no existen registros de lluvia (Kerr et al., 1989; Grist et al., 1997). Existe un acuerdo generalizado sobre la existencia de una fuerte dependencia entre la lluvia y el NDVI que involucra, por un lado, el retraso en la respuesta de la vegetación al estímulo hídrico (Henricksen y Durkin, 1986; Kerr et al., 1989; Grist et al., 1997) y, por otro, el aumento de la correlación cuando los registros se presentan acumulados de alguna manera (Hielkema et al., 1986; Bonifacio et al., 1993; Foody, 2003, citados por De La Casa y Ovando, 2006).

### **5.5.3. Fase de campo**

Se realizó el análisis a cada una de las nueve ventanas de monitoreo en las imágenes de satélite para poder detectar algún cambio, en específico en las cercanías de las zonas pobladas. Es importante recalcar que el área habitada en la subcuenca es mínima, la mayoría corresponde a la zona rural. Las imágenes de satélite indican un aumento en el área construida desde 1990 hasta el 2018.

Con respecto al análisis en campo, las imágenes tomadas por el Drone, permitieron ubicar zonas con afectaciones como depósitos de desechos sólidos (basureros) en caminos vecinales. Las siguientes imágenes muestran las condiciones de los distintos sitios visitados, los cuales no presentaron disturbios o cambios con base en lo revisado en las imágenes de satélite, en cuanto al uso de suelo, pero si se detectó la pérdida de suelo laminar.

Las imágenes y los videos del Drone permitieron reconocer las distintas condiciones de la parte noreste y suroeste de la subcuenca, ya que esta última zona presenta mayor vegetación, áreas agrícolas, zonas habitadas y cuerpos de agua.

Sitio: Núm. 5.  
Coordenadas: 645538.67, 2750937.88  
Lugar: Cuencamé.  
Fecha de captura: 18 de octubre de 2019.



Sitio: Núm. 3.  
Coordenadas: 650846.14, 2714591.15  
Lugar: Entronque a Santa Clara.  
Fecha de captura: 18 de octubre de 2019.



Sitio: Núm. 2.  
Coordenadas: 634245.26, 2678592.81  
Lugar: Ramón Corona, Cuencamé.  
Fecha de captura: 18 de octubre de 2019.



Sitio: Núm. 7.  
Coordenadas: 669226.78, 2689453.77  
Lugar: Ojitos, Juan Aldama.  
Fecha de captura: 19 de octubre de 2019.



Sitio: Núm. 8.  
Coordenadas: 682779.19, 2750744.36  
Lugar: Huarichic, Simon Bolívar.  
Fecha de captura: 16 de octubre de 2019.



Sitio: Núm. 1.  
Coordenadas: 647064.91, 2669631.20  
Lugar: Tierra Generosa, Miguel Auza.  
Fecha de captura: 20 de octubre de 2019.



## 5.6. Reservas de Carbono Orgánico en el Suelo (COS)

Los valores de carbono orgánico en el suelo que se obtuvieron a través del proceso en el programa *Soil & Environment* se presentan en el Cuadro 29. Para la subcuenca Río Medio Aguanaval se tiene un promedio de 36.31 t ha<sup>-1</sup>. Como valor mínimo se obtuvieron 9 t ha<sup>-1</sup> y como máximo 133 t ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 29. Carbono orgánico en el suelo en la subcuenca RMA.

Perfil	COS (t ha <sup>-1</sup> )	Prof total (cm)	Long O	Lat N	Suelo	Altitud (msnm)	Pp (mm)	Vegetación	Pendiente
1	28.92	33	102° 43' 57.42"	25° 0' 56.50"	Cambisol	1500	300	Matorral	3
2	13.53	34	103° 3' 28.76"	25° 5' 41.04"	Calcisol	1450	300	Matorral	3
3	50.08	57	102° 50' 27.44"	25° 4' 35.88"	Calcisol	1450	300	Matorral	3
4	20.27	40	103° 19' 53.49"	24° 55' 29.31"	Calcisol	1450	300	Matorral	1
5	31.28	62	102° 54' 11.69"	24° 54' 25.27"	Calcisol	1550	300	Matorral	1
6	39.23	35	103° 14' 8.05"	24° 54' 10.28"	Calcisol	1350	300	Agricultura de Riego	1
7	21.98	42	103° 3' 14.32"	24° 49' 7.67"	Calcisol	1450	300	Matorral	2
8	17.71	42	102° 53' 58.21"	24° 49' 26.67"	Calcisol	1500	300	Matorral	1
9	42.64	39	103° 11' 24.19"	24° 45' 16.90"	Kastañozem	1450	300	Agricultura de Riego	1
10	12.64	32	103° 13' 51.42"	24° 41' 55.09"	Calcisol	1550	300	Agricultura de Riego	1
11	53.06	48	103° 30' 40.76"	24° 33' 3.28"	Chernozem	1800	400	Agric. de Temporal	2
12	9.03	45	103° 33' 45.44"	24° 7' 43.88"	Planosol	2150	500	Vegetación de galería	2
13	21.24	17	103° 14' 52.94"	24° 58' 38.80"	Leptosol	1325	300	Matorral	40
14	30.12	51	103° 25' 41.33"	24° 57' 23.53"	Calcisol	1470	300	Matorral	1
15	55.77	56	103° 6' 31.95"	24° 44' 7.77"	Calcisol	1470	300	Matorral	2
16	36.39	24	103° 19' 45.77"	24° 32' 2.44"	Leptosol	1748	400	Matorral	2
17	133.72	23	103° 32' 46.08"	24° 42' 37.61"	Leptosol	2007	400	Matorral	30
18	87.48	68	103° 28' 56.13"	24° 25' 21.60"	Vertisol	1823	400	Pastizal	1
19	45.66	37	103° 11' 44.63"	24° 23' 8.86"	Luvisol	1946	400	Matorral	1
20	16.87	34	103° 38' 4.23"	24° 8' 42.46"	Umbrisol	2105	600	Agric. de Temporal	1
21	29.30	52	103° 35' 22.82"	23° 57' 30.91"	Luvisol	2250	500	Agric. de Temporal	1
22	10.83	45	102° 53' 0.43"	23° 56' 44.56"	Calcisol	1843	400	Matorral	10
23	28.60	65	103° 31' 12.49"	25° 11' 53.45"	Calcisol	1250	300	Matorral	5
24	20.48	40	103° 8' 46.07"	25° 17' 34.75"	Calcisol	1200	200	Matorral	4
25	12.28	33	102° 38' 17.09"	24° 39' 17.18"	Regosol	1600	300	Matorral	2
26	65.85	52	103° 42' 20.67"	24° 32' 22.29"	Chernozem	2100	500	Agric. de Temporal	1

27	41.27	32	103° 46' 2.88"	24° 23' 35.07"	Phaeozem	2100	500	Agricultura de Riego	1
28	25.84	12	102° 59' 7.95"	24° 22' 32.92"	Leptosol	1800	400	Matorral	15
29	18.58	53	103° 18' 14.89"	24° 6' 22.75"	Luvisol	2150	500	Agric. de Temporal	1
30	25.12	44	102° 38' 47.63"	24° 59' 30.29"	Calcisol	1413	300	Matorral	1
31	13.00	41	102° 40' 48.31"	24° 42' 35.30"	Solonetz	1526	300	Matorral	0
32	42.16	20	102° 43' 41.64"	24° 38' 9.46"	Leptosol	1589	300	Matorral	50
33	26.69	16	103° 39' 37.26"	24° 49' 1.00"	Leptosol	1675	400	Matorral	4
34	63.86	18	103° 47' 2.75"	24° 44' 54.21"	Phaeozem	1822	400	Matorral	20
35	22.89	17	103° 40' 12.78"	24° 38' 44.46"	Leptosol	1953	500	Matorral	15
36	53.55	20	103° 42' 39.16"	24° 43' 8.51"	Phaeozem	1805	400	Matorral	30
37	50.17	31	103° 49' 50.58"	24° 25' 55.69"	Phaeozem	2088	500	Agric. de Temporal	1
38	56.67	29	103° 41' 16.07"	24° 21' 12.38"	Phaeozem	2052	500	Pastizal	1
39	47.27	53	103° 50' 4.87"	24° 15' 45.29"	Phaeozem	2131	600	Agric. de Temporal	1
40	30.19	12	102° 54' 6.67"	24° 16' 19.65"	Leptosol	1705	300	Matorral	25

Se realizó la comparación entre los interpoladores del programa ArcGIS 10.1, donde se encontró que tanto el interpolador IDW y el Kriging arrojaron la mejor interpolación, basándose en los estadísticos básicos (la media y la desviación estándar) (Cuadro 30).

Cuadro 30. Comparación entre interpoladores para el COS.

No. de perfiles	COS min (t ha <sup>-1</sup> )	COS máx (t ha <sup>-1</sup> )	COS min calc (t ha <sup>-1</sup> )	COS máx calc (t ha <sup>-1</sup> )	Interpolador	Media (t ha <sup>-1</sup> )	Desvest
40	9.03	133.72	9.03	133.72	IDW	37.56	15.63
			15.35	113.82	KRIGING	38.51	12.72
			9.48	132.12	NATURAL NEIGHBOR	39.59	18.09
			-5.33	156.45	SPLINE	40.93	27.18

Se realizó una segunda comparación entre cada uno de las potencias de ambos interpoladores, resultando que Kriging ordinario exponencial (Cuadro 31) representa mejor los valores de carbono orgánico en el suelo (COS) de la subcuenca con base en los estadísticos obtenidos. Villatoro, Henríquez y Sancho, (2008) compararon los interpoladores Kriging y el IDW, por ser los más utilizados en los estudios de análisis de la variación espacial, en un área de 2,467 m<sup>2</sup>, se georreferenciaron 61 puntos a una distancia de 3,5 m entre sí. Tomaron muestras de suelo a una profundidad de 0 - 15 cm en cada uno de los puntos. Emplearon el programa GS+ para Windows para el análisis



de variogramas, interpolación y validación cruzada. Con valores de pH, Ca, CICE y P del suelo, realizaron las interpolaciones, obteniendo que, aunque ambos interpoladores tuvieron un desempeño similar, Kriging fue superior al predecir de una mejor manera la variación de pH, Ca, y CICE, mientras que el IDW lo fue con el P.

Cuadro 31. Comparación entre potencias de interpoladores.

Interpolador	Potencia	COS min calc (t ha <sup>-1</sup> )	COS max calc (t ha <sup>-1</sup> )	Media (t ha <sup>-1</sup> )	Desvest
IDW	P1	11	122	37.64	10.81
	P2	9	133	37.50	15.58
	P3	9	133	37.67	19.28
	P4	9	133	37.93	21.67
KRIGING	K. O. SPHERICAL	15	113	38.51	12.71
	K. O. CIRCULAR	22	73	37.88	11.12
	K. O. EXPONENCIAL*	10	129	38.17	12.35*
	K. O. GAUSSIAN	16	106	38.10	8.67
	K. O. LINEAR	23	65	37.89	10.26
	K. U. LINEAL CON DERIVADA LINEAL	16	61	35.07	9.24
	K. U. LINEAL CON DERIVADA CUADRÁTICA	9	101	41.16	16.93

La interpolación se representó en 9 clases (Figura 31), con el fin de tener una mejor visualización de la distribución del contenido de carbono orgánico en el suelo. Se observa que los valores superiores a 50 t ha<sup>-1</sup> se encuentran en la zona centro hacia el oeste, perteneciente en mayor superficie al estado de Durango. Los valores más bajos se encuentran en la parte sur del estado de Coahuila y parte noreste de Zacatecas.

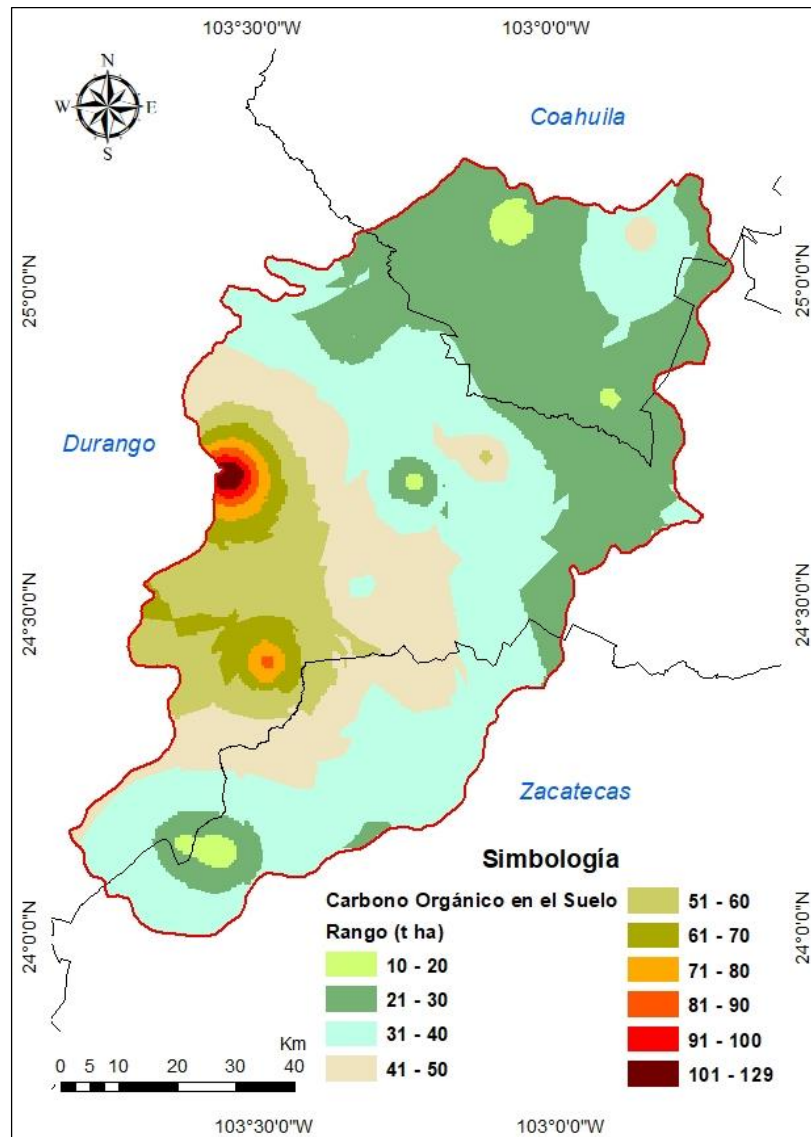


Figura. 33. Contenido de carbono orgánico en la SRMA mediante el interpolador Kriging. Fuente: Elaboración propia.

Segura-Castruita *et al.*, (2005) determinaron el contenido de COS en el horizonte superficial de los suelos de México, mediante un total de 4,583 muestras de suelo del horizonte superficial (0 a 20 cm) además generaron un mapa raster a través de la interpolación, encontrando valores desde 0.2 hasta 493 t ha<sup>-1</sup>, los cuales fueron divididos en cinco clases (Figura 32). El cuadro negro indica la zona de estudio que presenta valores de entre 25 a 50 t ha<sup>-1</sup>, lo que concuerda con los resultados de este estudio que presenta una media de 36 t ha<sup>-1</sup>.

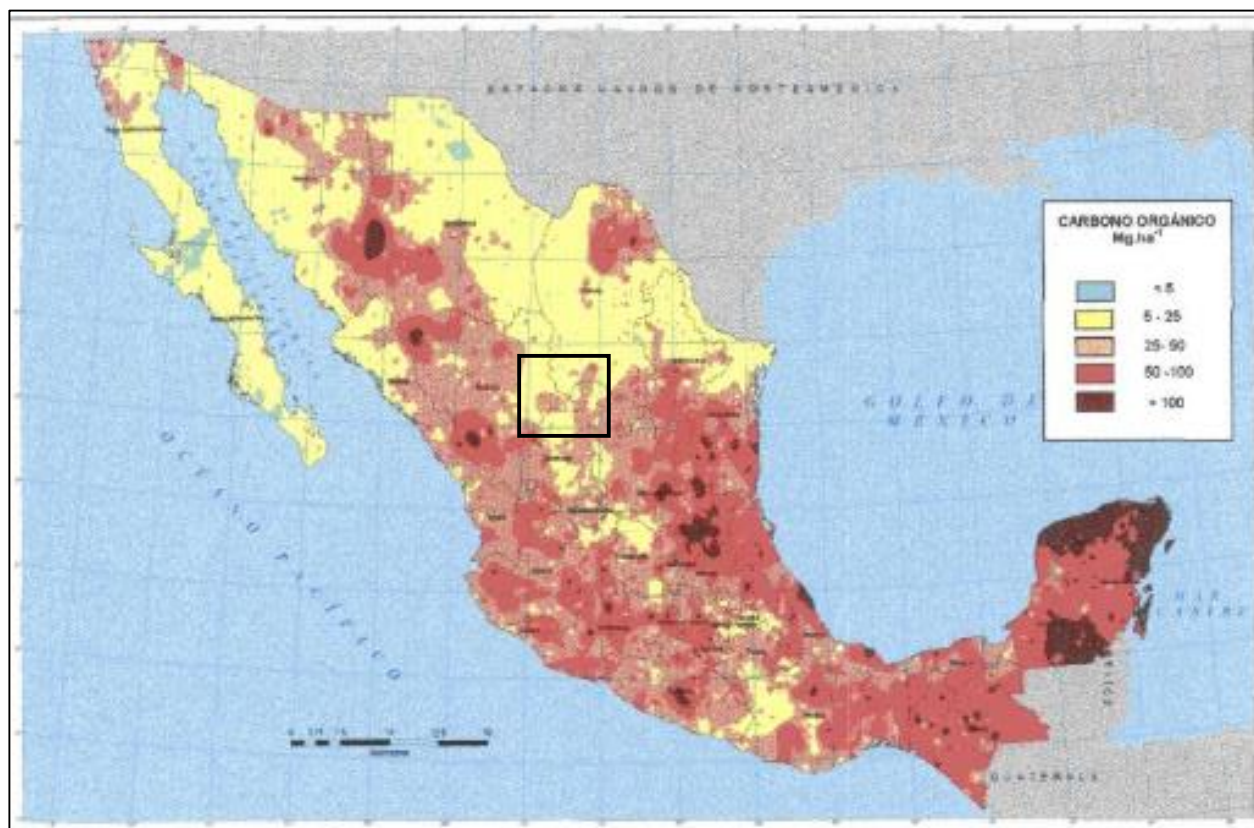


Figura. 34. Contenido de carbono orgánico en la capa superficial (0 a 20 cm) en los suelos de México.

La FAO (2017) elaboró un mapa de carbono orgánico mundial con resolución de 1 kilómetro, con una profundidad de 0 a 30 cm, ubicando la zona de interés para este estudio (cuadro negro), el rango está entre 25 a 40 t ha<sup>-1</sup> (Figura 33), lo cual considera la media obtenida en esta investigación.

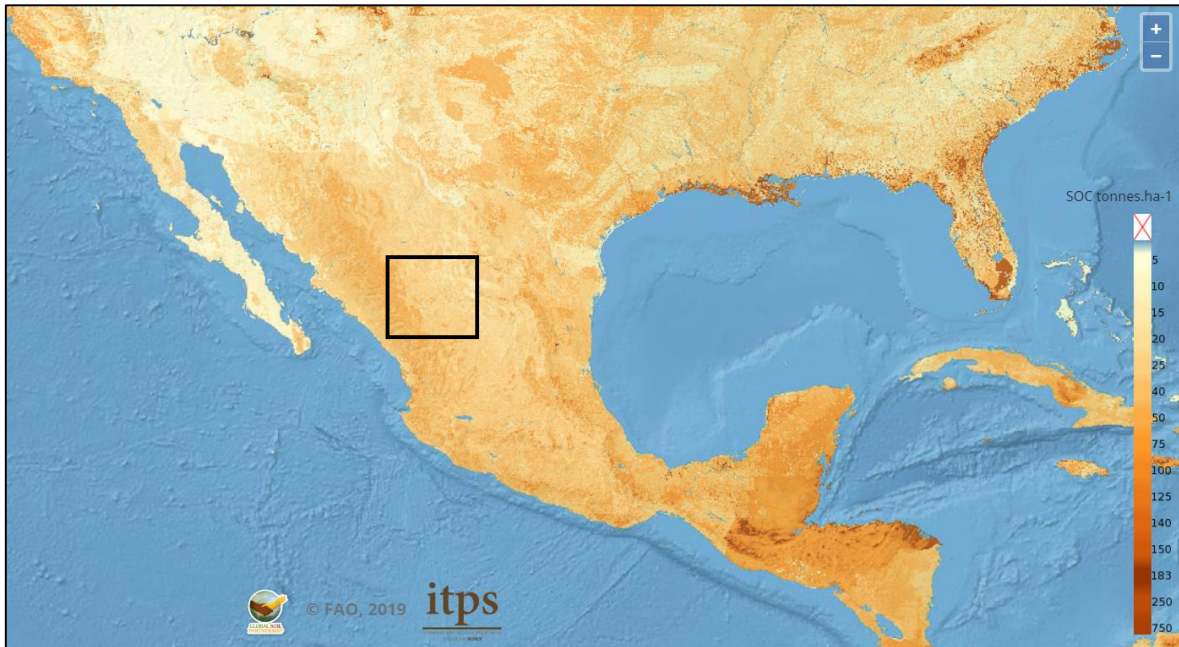


Figura. 35. Contenido de carbono orgánico según la FAO 2017.

La mayor distribución de carbono se encuentra en zonas de pastizal natural, agricultura de riego anual y temporal anual además del matorral desértico micrófilo pertenecientes a la parte central que corresponde al estado de Durango, con un rango altitudinal de 1,600 a 2,200 metros sobre el nivel del mar.

Mondal *et al.*, (2017) estimaron la distribución de carbono orgánico del suelo (COS) en categorías variadas de pendiente, suelo y uso del suelo. Observaron que la concentración de COS es mayor en áreas bajas y elevadas en suelos arcillosos con tierras principalmente agrícolas y con vegetación. Además, se observó que el stock disminuye con la creciente pendiente. En las categorías de suelo, la arcilla tiene el mayor contenido de carbono, seguido de arcilla franco, arcilla arenosa franco y franco arenoso. Se encuentra más carbono con la mayor cantidad de contenido de arcilla. En los tipos de uso del suelo, las vegetaciones tienen el mayor contenido de carbono, seguido de la agricultura y tierras en barbecho.

Yescas-Coronado *et al.*, (2018) determinaron las reservas de carbono orgánico e inorgánico en suelos agrícolas de la Comarca Lagunera de México, utilizaron el método geoestadístico Kriging ordinario y validaron los mapas temáticos con datos de campo.

En la fase de campo se tomaron muestras de nueve sitios distribuidos en la subcuenca con base en las ventanas de monitoreo con imágenes de satélite. La información obtenida

de las muestras de suelo, analizadas en el laboratorio, se ingresó en el programa S&E (Cuadro 32) donde se obtuvo una media de 24.4 t ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 32. COS para sitios de muestreo.

Sitio	COS (t ha <sup>-1</sup> )	X	Y	Municipio	Tipo de clima	Suelo	Pendiente
1	11	647064.91	2669631.20	Miguel Auza	Semiárido, templado	Phaeozem	1
2	21.84	634245.26	2678592.81	Cuencamé	Semiárido, templado	Umbrisol	1
3	27.35	650846.14	2714591.15	Cuencamé	Semiárido, templado	Chernozem	2
4	11.65	683904.44	2725134.12	Simón Bolívar	Árido, semicálido	Phaeozem	1
5	6.37	645538.67	2750937.88	Cuencamé	Árido, semicálido	Calcisol	1
6	8.92	709415.06	2744386.03	Simón Bolívar	Muy árido, semicálido	Calcisol	1
7	40.1	669226.78	2689453.77	Juan Aldama	Semiárido, templado	Chernozem	1
8	41.84	682779.19	2750744.36	Simón Bolívar	Muy árido, semicálido	Calcisol	1
9	50.53	675795.90	2761988.68	Torreón	Muy árido, semicálido	Leptosol	3

Es relevante considerar que el número de sitios muestreados para la fase de campo fue muy bajo a comparación de los 40 sitios analizados de los perfiles edafológicos del INEGI, donde la media fue de 36 t ha<sup>-1</sup>, a pesar de esto, los resultados obtenidos con el muestreo de suelo, no difieren de lo obtenido por la FAO (2017) y Segura-Castruita *et al.*, (2005) para la subcuenca.

### 5.7. Línea Base de Degradación Nacional (LBDN 2013)

La Figura 34 muestra las categorías de la línea base de degradación nacional elaborada por la CONAFOR-UACH en 2013 para la subcuenca Río Medio Aguanaval, la cual señala cinco categorías de degradación para la subcuenca, donde la categoría que predomina es la severa.

Al considerar los indicadores evaluados para la línea base de degradación para la subcuenca Río Medio Aguanaval, además de la aportación de la fase de campo, se determina que el nivel moderado de degradación es el que prevalece en la subcuenca (Figura 35).

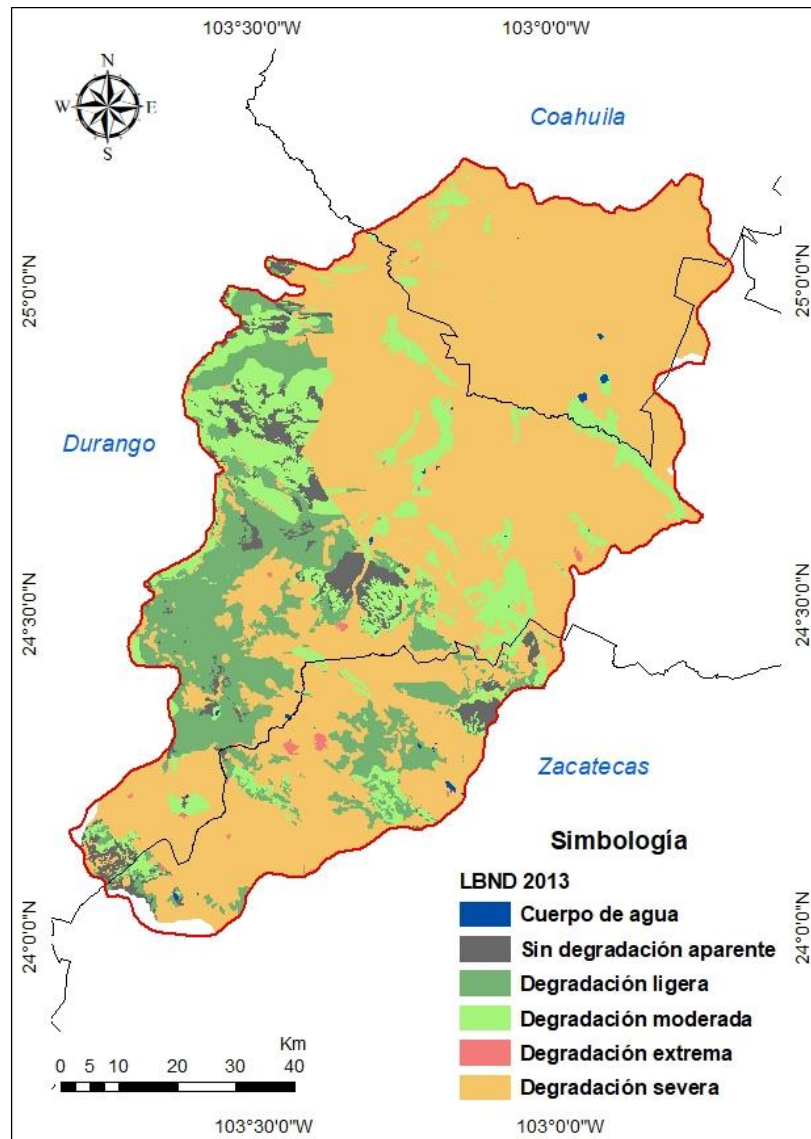


Figura. 36. Línea base de degradación nacional (2013) para la SRMA.

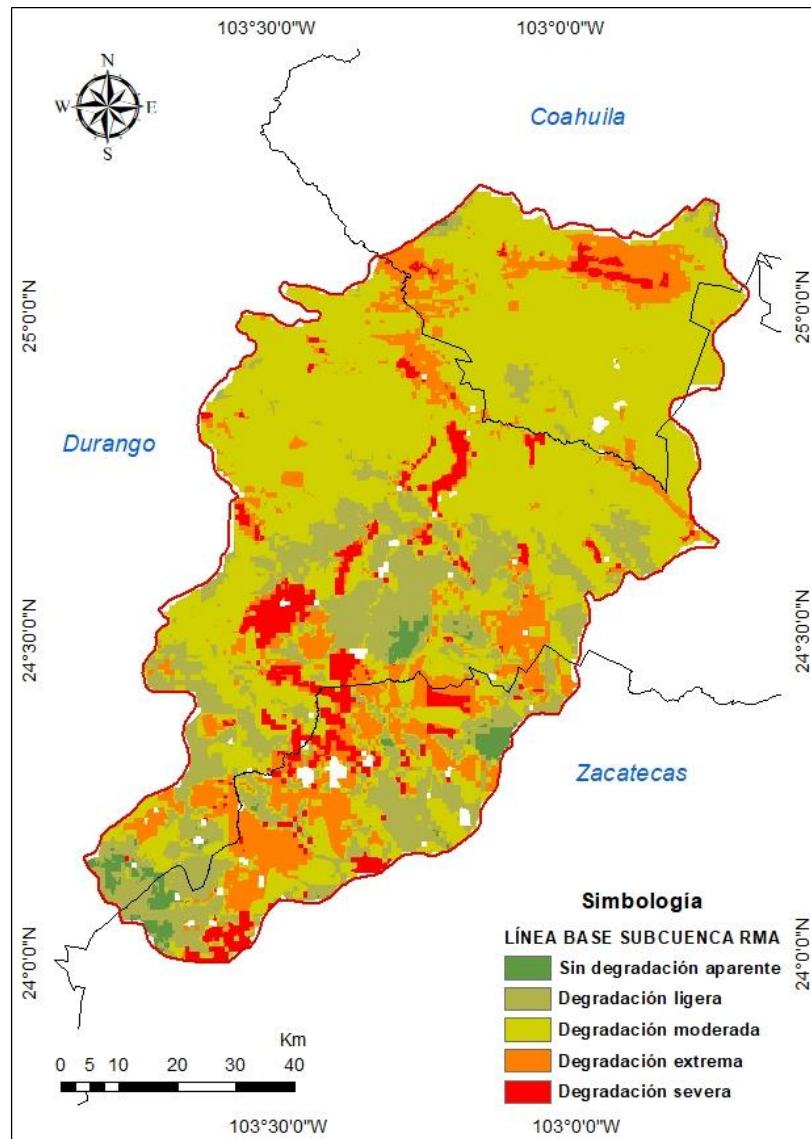


Figura. 37. Línea base de degradación de la subcuenca.

## **6. Conclusiones**

### **6.1. Conclusión general**

La línea base nacional de degradación (CONAFOR-UACH, 2013) señala cinco categorías de degradación para la subcuenca Río Medio Aguanaval, donde la categoría de degradación severa es la que predomina. Con relación a esto, y al considerar los indicadores evaluados para la línea base de la degradación de la tierra para la subcuenca, además de la aportación de la fase de campo, se determina que la línea base nacional (CONAFOR-UACH, 2013) sobrestima la condición de la subcuenca, ya que esta presenta un nivel moderado de degradación.

En cuanto a la aportación de los indicadores utilizados para evaluar el nivel de degradación de la subcuenca, se considera que aportan una buena descripción de la condición actual, ya que permitieron definir el nivel de degradación en la subcuenca.

Con base en esta investigación, se recomienda a los gobiernos de distintos municipios que integran la subcuenca, el análisis de esta línea base de la degradación de la tierra de la subcuenca Río Medio Aguanaval. Con el fin de que, con base a las condiciones actuales de cada municipio plasmadas en este documento se puedan considerar e implementar actividades, a nivel local, para el manejo de los recursos naturales.

### **6.2. Conclusiones específicas**

Se generaron mapas de aridez para la subcuenca Río Medio Aguanaval, empleando dos índices de aridez, donde en ambos, se encontraron tres categorías con diferente distribución. Se puede percatar que, con más del 58 % la zona árida (B2) (Stretta y Mosiño (1963)) y con 68 % la zona semiárida (De Martonne (1926)), es la que destaca, solo difiere en la clasificación de los índices.

Mediante la metodología SEDESOL-INE (1998) y la integración de los sistemas de información geográfica, se estimó la pérdida de suelo en la subcuenca Río Medio Aguanaval. Los registros van desde zonas con erosión hídrica laminar ligera (valores de 0) hasta zonas con erosión muy alta ( $364 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Las cantidades mayores de suelo perdido, a causa de la lluvia, se ubican en la zona centro y suroeste de la subcuenca, zonas principalmente descubiertas por estar destinadas a la agricultura. El grado de erosión que domina es el moderado con pérdidas de  $10 \text{ a } 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En cuanto a la



erosión eólica laminar, la pérdida de suelo va desde las zonas donde aparentemente no hay erosión eólica laminar (valores de 9) hasta zonas con erosión muy alta ( $290 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La mayor pérdida se ubica en la zona centro y suroeste de la subcuenca, zona principalmente descubierta por estar destinada a la agricultura. El grado de erosión que domina es el moderado con pérdidas de  $10 \text{ a } 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . De manera conjunta, las zonas donde se presenta mayor erosión tanto hídrica como eólica, es en las categorías de zonas áridas B2 y semiáridas A3, ubicadas del centro hacia el sur de la subcuenca Río Medio Aguanaval.

Se visualizaron y analizaron los cambios en la cubierta vegetal, ya que los mayores cambios encontrados fueron, el aumento en superficie de la agricultura de temporal anual y la disminución en la superficie del pastizal natural. En cuanto a la productividad evaluada, se presentan fluctuaciones en los cambios de clases, considerando la más importante al aumento en la zona construida, que presenta una ampliación constante, así como el aumento de la superficie de cuerpos de agua, referido a la época seca. En cuanto a la época húmeda la superficie de cultivos presenta una disminución para el año 2010, para registrar una tendencia al aumento, posteriormente. La respuesta del NDVI varió a lo largo del análisis, presentando valores menores en la época de secas y aumentando su valor de respuesta hacia la temporada de lluvias. Los valores del NDVI estuvieron en relación directa con la cobertura del dosel a lo largo de las temporadas.

El contenido de carbono orgánico de suelos (COS), presenta un amplio rango en la subcuenca con valores desde  $9 \text{ t ha}^{-1}$  hasta  $133 \text{ t ha}^{-1}$ , obtenido a través del interpolador Kriging ordinario. En cuanto a la distribución por entidad los valores mayores se ubican en la porción oriental del estado de Durango. Los registros más bajos de COS se ubican en la parte noreste de la subcuenca, correspondiente al sur del estado de Coahuila.

## 7. Literatura citada

- Abaurrea Pereda, M. (2013). *Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de Navarra*. (Tesis de licenciatura, Universidad Pública de Navarra). Consultada en <https://academic.e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/7790/578142.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ahmad, A & Quegan, S. (2012). Analysis of Maximum Likelihood Classification on Multispectral Data. *Applied Mathematical Sciences*, 6(129), pp. 6425 – 6436.
- Andersen. E. B. (1980). *Discrete Statistical Models with Social Science Applications*. North Holland. E.U.A.
- Andrade, O., Briceño, J., Erasmi, S., Kappas, M., & Unda, J. (2010). Generación y mapeo de parámetros ambientales con fines de evaluación de tierras en el municipio Torres, Estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 22(2), pp. 115-126.
- Arango G. M., Branch B. J. W. y Botero F. V. (2006). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "Landsat – ETM+". *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín*. 58(1), pp. 2611-2634. Consultado en <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v58n1/a04v58n1.pdf>.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0. Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 45 pp.
- Banimahd, S. A. & Khalili, D. (2013). Factors influencing Markov Chains redictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Water Resour Manage*, 27, pp. 3911–3928, doi:10.1007/s11269-013-0387-z.
- Bautista Z. F. (Ed). (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. (2ª ed). México. ISBN 978-607-02-2127-9.
- Bautista, F., Gallegos, A. y Pacheco, A. (2016). Análisis de las funciones ambientales de los suelos con datos de perfiles (Soil & Environment). México. Skiu. ISBN 978-607-96883-6-3.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan Pérez, J. I., Pineda Jaimes, N. B., Cadena Vargas, E. G., Bravo Peña, L. C. y Sánchez López, M. (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), pp. 93-112.
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), pp. 35-52. ISSN 0187-8336.
- Castro Mendoza, I. (2013). Estimación de perdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIV (2), pp. 3-16. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382013000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200001) [Consultado 08-07-2018].

- Cieza Coronel, L. G. y Mejía Marcacuzco, J. A. (2019). Comparación de tres métodos en el análisis de sequías hidrometeorológicas en la cuenca del Río llave Puno – Perú. *INGENIERÍA UC*, 26 (1). Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70758484003/html/index.html> [Consultado 11-04-2020]
- Comisión Europea. (2013). *Cambio climático y degradación de los suelos en América Latina: escenarios, políticas y respuestas*. Programa EUROCLIMA, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea. Bruselas, Bélgica. 188 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Subcuencas hidrológicas'. Extraído de Boletín hidrológico. (1970). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Consultado 28-06-2018].
- CONAFOR-UACH. (2013). Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco.
- CONAGUA, (2015). Atlas del Agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 138 p.
- Cotler Ávalos, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Pluralia Ediciones e Impresiones, S.A. de C.V. ISBN 978-607-7655-07-7.
- Cowie, A. L., B. J. Orr, V. M. Castillo Sanchez, P. Chasek., N. D. Crossman, A. Erlewein, G. Louwagie, M. Maron, G. I. Metternicht, S. Minelli, A. E. Tengberg, S. Walter & S. Welton. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science & Policy*, 79, pp. 25-35, ISSN 1462-9011, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901117308146>).
- Cuervo Robayo, A. P., Téllez Valdés, O., Gómez Albores, M. A., Venegas Barrera, C. S., Manjarrez, J., Martínez Meyer, E. (2014). Temperatura media anual en México (1910-2009), escala: 1:1, 000,000. Modificado por CONABIO (2015). México, D. F. Acceso en línea: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/tman13gw.xml? httpcache=yes& xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl& indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/tman13gw.xml? httpcache=yes& xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl& indent=no)
- De La Casa, A. y Ovando, G. (2006). Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA*, 35 (1), pp. 67-85. ISSN edición en línea 1669-2314.
- Díaz-Padilla, G.; Sánchez-Cohen, I.; Guajardo-Panes, R. I.; Del Ángel-Pérez, A. I.; Ruíz-Corral, A; Medina-García, G.; Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Volumen XVII, Edición especial: 267-275.
- Easdale, M. H. (2016). Zero net livelihood degradation – the quest for a multidimensional protocol to combat desertification. *SOIL*, 2, 129–134. doi:10.5194/soil-2-129-2016. [www.soil-journal.net/2/129/2016/](http://www.soil-journal.net/2/129/2016/)

- Emanuelli, P., Milla, F., Duarte, E., Torrealba, J., Garrido Ruiz, C., Colmenares, M., Orellana Díaz, O. y López, S. (2016). Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD). Sud-Austral Consulting SpA. 28 p. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/312138970\\_Convencion\\_de\\_Naciones\\_Unidas\\_de\\_Lucha\\_contra\\_la\\_Desertificacion\\_CNULD](https://www.researchgate.net/publication/312138970_Convencion_de_Naciones_Unidas_de_Lucha_contra_la_Desertificacion_CNULD)
- Escobar Pedraza, J. J., González Barrios, J. L., Sánchez Cohen, I., Muñoz Villalobos, A. y Villa Castorena, M. (2012). Análisis de la lluvia y su relación con fenómenos del cambio climático; Estudio de caso en estación meteorológica Sardinias (San Bernardo, Durango). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, pp. 75-84.
- ESRI. (2008). *GIS Best Practices — GIS and Science*. ESRI Press. California, E.U.A.
- FAO. (1976). A framework for land evaluation. Soils Bulletin 32. FAO. Rome.
- FAO y GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos, Roma, Italia.
- FAO, (2017). GSP Guidelines for sharing national data/information to compile a Global Soil Organic Carbon (GSOC) map. Pillar 4 Working Group.
- FAO and ITPS, (2018). Global Soil Organic Carbon Map - GSOCmap. Version 1.2.0. FAO, Rome, Italy.
- Fernández Prias, D. Y. (2015). Cálculo del índice de aridez como herramienta para el seguimiento de la desertificación. Facultad de ingeniería, Dirección de postgrados. Universidad Militar Nueva Granada. 20 pp.
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L., Pizarro, M. J., Carfagno, P. y Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Buenos Aires: Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-857-4 [Consultado 22-07-2018].
- Gallegos, A. & Bautista, F. & Dubrovina, I. (2016). Soil & Environment a tool for soil environmental functions evaluation. *Programmnye produkty i sistemy* (Software & Systems). 2. 195-200. 10.15827/0236-235X.114.195-200.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana. (5ª ed). Instituto de Geografía-UNAM. México. 93 p. ISBN 970-32-1010-4.
- Giddings, L., M. Soto, B. M. Rutherford and A. Maarouf. (2005). Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmósfera*, pp. 33-56.
- González, P. A. y Sosa, C. M. (2003). Análisis de la vegetación del área de protección de flora y fauna Cañón de Santa Elena (Desierto Chihuahuense, México) utilizado Modelos Digitales de Elevación. *Ecosistemas*, 2003/2  
<http://www.aeet.org/ecosistemas/032/investigacion1.htm>

- Gómez Sántiz, N. (2016). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en el municipio de Oxchuc, Chiapas. (Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Chiapas, México). Disponible en: <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/20.../GEO%20631.45%20G65%202016.pdf> [Consultado 14-07-2018].
- Huerta Fernández, P. y Loli Figueroa, O. (2014). Erosión hídrica en la cuenca alta del río Moche. *Ecología Aplicada*, 13(1), pp. 15-22. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v13n1/a02v13n1.pdf> [Consultado 04-07-2018].
- INECC, (2007). El Suelo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap1.html>
- INEGI, (2014). 'Conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelo, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)', escala: 1:250000. Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI, (2014). 'Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)', escala: 1:250000. Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI, (2016). 'Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250000 Serie VI. (Capa unión)', escala: 1:250000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI, (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. Acceso en línea: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml? httpcach e=yes& xsl=/db/metadatos/xsl/fqdc.html.xsl& indent=no>
- IPBES, (2018). Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. R. Scholes, L. Montanarella, A. Brainich, N. Barger, B. ten Brink, M. Cantele, B. Erasmus, J. Fisher, T. G. Holland, F. Kohler, J. S. Kotiaho, G. Von Maltitz, G. Nangendo, R. Pandit, J. Parrotta, M. D. Potts, S. Prince, M. Sankaran and L. Willermen (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 44 pages.
- López Santos, A. (2016). Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? *Terra Latinoamericana*, 34(2), pp. 239-249. ISSN 2395-8030. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792016000200239&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000200239&lng=es&tlng=es).
- López Santos, A., Pinto Espinoza, J., Esquivel Arriaga, G., Randeles Reyes, V. H. y Bueno Hurtado, P. (2015). *Escenarios Climáticos Locales a Partir de una Metodología Basada en los Modelos de Circulación Global del IPCC*. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 978-607-12-0403-5.
- López Santos, A., Sánchez Cohen, I., Esquivel Arriaga, G. y González Barrios, J. L. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad de los suelos del estado de Durango, México en el contexto del cambio climático. *Agrociencia Uruguay* Special Issue 16,

pp. 117-127. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/264235472\\_EVALUACION\\_DE\\_LA\\_VULNERABILIDAD\\_DE\\_LOS\\_SUELOS\\_DEL\\_ESTADO\\_DE\\_DURANGO\\_MEXICO\\_EN\\_EL\\_CONTEXTO\\_DEL\\_CAMBIO\\_CLIMATICO](https://www.researchgate.net/publication/264235472_EVALUACION_DE_LA_VULNERABILIDAD_DE_LOS_SUELOS_DEL_ESTADO_DE_DURANGO_MEXICO_EN_EL_CONTEXTO_DEL_CAMBIO_CLIMATICO) [Consultado 30-07-2018].

- López-Santos, A. & Martínez-Santiago, S. (2015). Use of two indicators for the socio-environmental risk analysis of Northern Mexico under three climate change scenarios. *Air Qual Atmos Health*. 8(4), pp. 331-345. (ISSN: 1873-9318). Doi: 10.1007/s11869-014-0286-3. Consultado en <https://drive.google.com/open?id=0Bw2CfpaJhCizc09RUEk3di1TX1E>
- López-Santos, A., Bueno-Hurtado, P., Arreola-Ávila, J. G. y Pérez-Salinas, J. E. (2017). Acciones para conservación de suelos identificadas mediante índices Kappa al noreste de Durango, México. *Agrociencia*, 51, pp. 591-605.
- López-Santos, A., Pinto Espinoza, J., Ramírez López, E. M. y Martínez Prado, M. A. (2013). Modeling the potential impact of climate change in northern Mexico using two environmental indicators. *Revista Atmósfera*, 4(26), pp. 479-498, (ISSN: 0187-6236). <https://drive.google.com/open?id=0Bw2CfpaJhCizUGc4Si1iY0NONXM>
- Lugo-Hubp, J., F. Aceves-Quezada *et al.* (1992). El relieve como atractivo natural en Estados de los componentes naturales del medio ambiente, V.2.1 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4, 000,000. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Martínez H. E., J. P. Fuentes E., E. Acevedo H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *R. C. Suelo Nutr Veg*, 8(1), pp. (68-96).
- Mercado-Mancera, G., Troyo-Diéguez, E., Aguirre-Gómez, A., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, L. F., García-Hernández, J. L. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez De Martonne para el análisis del déficit hídrico como un estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. *Universidad y Ciencia. Trópico húmedo*. 26(1), pp.51-64.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F. y Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen, Sección Agronomía*, Año XIII (11).
- Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., Mondal, S., Mukherjee, S. and Mukhopadhyay, A. (2017). Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 20, pp. 61–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.004>
- Moreno-Reséndez, A., Reyes-Carrillo, J. L. y Márquez-Quiroz, C. (Coord.). (2015). *Tópicos Selectos de Sustentabilidad: Un Reto Permanente*. Volumen III. Ed. de la Universidad Juárez del estado de Durango. ISBN: 978-607-503-186-6. 53-71 pp.
- Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación (CNULD). (2017). *Perspectiva global de la tierra*, (1ª ed), Bonn, Alemania. ISBN: 978-92-95110-52-6, eISBN: 978-92-95110-51-9. Disponible en: ([https://knowledge.unccd.int/sites/default/files/2018-6/GLO%20Spanish\\_Full\\_Report\\_rev1.pdf](https://knowledge.unccd.int/sites/default/files/2018-6/GLO%20Spanish_Full_Report_rev1.pdf)).

- Nkonya, E., A. Mirzabaev & J. von Braun (Eds). (2016). *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. ISBN 978-3-319-19167-6 ISBN 978-3-319-19168-3 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-19168-3
- Núñez, J. M., Rodríguez, Y., Carrillo, K. y Madrigal, J. M. (2010). *Esquema para el monitoreo de impacto sobre la cubierta forestal en corredores biológicos de Chiapas*. XIV Simposio SELPER, Guanajuato, México. ISBN 978-607-441-100-3.
- Ordoñez G. J. J. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrológica?* (1ª ed), Sociedad Geográfica de Lima, ISBN: 978-9972-602-76-4.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario. 16 p. ISBN 978-92-63-31090-3.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (2016): Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). *Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías*. Ginebra. ISBN 978-92-63-31173-3, ISBN 978-91-87823-29-9.
- Orr, B. J., A. L. Cowie, V. M. Castillo Sánchez, P. Chasek, N. D. Crossman, A. Erlewein, G. Louwagie, M. Maron, G. I. Metternicht, S. Minelli, A. E. Tengberg, S. Walter, and S. Welton. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality*. A Report of the Science-Policy Interface. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Germany.
- Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado Izquierdo, J. M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chias Becerril, L., Ortiz Álvarez, M. I., González Sánchez, J., Negrete Fernández, G., Gabriel Morales, J., Márquez Huitzil, R., Niedo Manzano, T., Jiménez Rosenberg, R., Muñoz López, E., Ocaña Nava, D., Juárez Aguirre, E., Anzaldo Gómez, C., Hernández Esquivel, J. C., Valderrama Campos, K., Rodríguez Carranza, J., Campos Campuzano, J. M., Vera Llamas Cruz, H. y Camacho Ramírez, C. G. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pedroza Sandoval, A. (1995). *El déficit hídrico en las plantas. Principios y técnicas de manejo*. Primera edición. Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.
- Pedroza Sandoval, A., Sánchez Cohen, I., Becerra López, J. L., Ramos Cortez, E., Reyes Bernabé, C., Rosales Palacios, L. V. y Vargas Piedra, G. (2014). Regionalización de zonas con escaso régimen pluvial: Estudio de caso zona Centro-Norte del estado de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIII (2), pp. 71-85. doi: 10.5154/r.rchsza.2013.03.01
- Pinto-Espinoza, J., Martínez-Prado, M. y López Santos, A. (2014). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Durango. Resumen ejecutivo 2013-2016. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170324/2012\\_dgo\\_peacc.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/170324/2012_dgo_peacc.pdf)

- Rivera del Río, R., Crespo Pichardo, G., Arteaga Ramírez, R., & Quevedo Nolasco, A. (2007). Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 25 (4), pp. 383-392. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57315558006> [Consulta 11 de Abril de 2020].
- Sanderson, R. (2007). Introduction to remote sensing. New México Space Grant Consortium.
- SEDESOL-INE. (1998). Ordenamiento ecológico del territorio. Memoria Técnica y metodológica. Secretaría de Desarrollo Social e Instituto Nacional de Ecología. pp. 629.
- Segundo de Jesús, E. (2018). Índice estandarizado de precipitación (SPI) y su relación con superficie agrícola siniestrada en el estado de Zacatecas. (Tesis de maestría, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México). 145 pp.
- Segura-Castruita, M. A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez-Castorena, Ma. del C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), pp. 21-28.
- SEMARNAT, (2002), Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicado el 31 de diciembre de 2002 en el Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección, México.
- SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. La degradación de los suelos en México. Disponible en: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/03\\_suelos/cap3\\_2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_2.html) [Consultado 04-07-2018].
- Stretta, E. J. y Mosiño, P. A. (1963). Distribución de las zonas áridas de la república según un nuevo índice de aridez derivado del de Emberger. *Ingeniería hidráulica en México*. 16 (1), pp. 40-47.
- Towhid, O. K. (2013). *Soils. Principles, properties and management*. Springer. ISBN 978-94-007-5662-5 ISBN 978-94-007-5663-2 (eBook). Doi: 10.1007/978-94-007-5663-2.
- Troyo Diéguez, E., Mercado Mancera, G., Cruz Falcón, A., Nieto Garibay, A., Valdez Cepeda, R. D., García Hernández, J. L., & Murillo Amador, B. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones geográficas*, (85), pp. 66-81. <https://dx.doi.org/10.14350/rig.32404>
- United Nations (UN). (2016). Geospatial and earth observations in support of the global indicator framework. Statistical-Geospatial Integration side event: 48<sup>th</sup> session of the United Nations statistical commission. UN Conference Centre, New York.



- UNCCD. (2015). Resultados de la 3a Conferencia Científica de la UNCCD. Cambio climático y degradación de las tierras: Acercar los conocimientos a las partes interesadas.
- UNCCD. (2016). Achieving Land Degradation Neutrality at the country level. Building blocks for LDN target setting. The Global Mechanism of the UNCCD.
- UNCCD. (2016). Neutralidad de la degradación de las tierras. Programa de establecimiento de metas. Establecimiento de metas para la neutralidad de la degradación de las tierras. Guía técnica. 68 pp.
- UNESCO. (2009). Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R. y Balocchi, F. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°18. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216337s.pdf> [Consultado 14-07-2018].
- Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF). (s/f). Reporte de Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT) ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD). Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (2017-2025) de Chile. 46 p. [https://redd.unfccc.int/uploads/4833\\_6\\_reporte\\_ldn\\_282ene2018\\_29\\_vfpc.pdf](https://redd.unfccc.int/uploads/4833_6_reporte_ldn_282ene2018_29_vfpc.pdf)
- Vásquez, A. y Tapia M., M. (2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *Revista INGENIERÍA UC*, 18(3), pp. 42-50. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70723269005> [Consultado 14-07-2018].
- Velasco, I. y Pimentel, E. (2009). Zonificación agroclimática de Papadakis aplicada al estado de Sinaloa, México. *Investigaciones geográficas*. (73), ISSN 2448-7279.
- Velásquez V. M. A., Esquivel A. G., Sánchez C. I., Gutiérrez L. R., Muñoz V. J. A., Macías R. H. y Bueno H. P. (2013). Respuesta hidrológica de diferentes usos del suelo en las zonas áridas del estado de Durango, México. Folleto Técnico N° 29. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. INIFAP. Gómez Palacio, Dgo. México. 41 p. ISBN: 978-607-37-0120-4.
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), pp. 95-105. ISSN:0377-9424
- Weng, Q. (2010). Remote Sensing and GIS Integration. Theories, Methods, and Applications. Mc Graw Hill. USA. ISBN: 978-0-07-160654-7.
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V. de P., Segura-Castruita, M. A., García-Carrillo, M., Hernández-Hernández, V. y González-Cervantes, G. (2018). Variabilidad espacial del carbono orgánico e inorgánico del suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 591-610.