



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Facultad de Ingeniería Civil

Determinación del riesgo ante sequías en la cuenca del Río Angulo.

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Presenta

Ing. Carolina Rocha Delgado

Ingeniera Civil

Director de tesis

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

Doctor en Ciencias de la Tierra

Co-Director de tesis

Dr. José Jaime Madrigal Barrera

Doctor en Ingeniería del Agua y Medioambiental



Morelia, Mich. Mayo del 2025

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la institución donde inicié y me desarrollé académicamente.

Al programa de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, por aceptarme en el programa que me permitió especializarme en mi campo.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el respaldo económico que hizo posible esta investigación.

A la Universidad Politécnica de Valencia, así como al Dr. Abel Solera Solera, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi estancia de investigación en su institución.

A mis asesores, quienes me guiaron durante este recorrido con su conocimiento para terminar esta investigación. Su apoyo constante ha sido fundamental en este proceso.

A mis sinodales, quienes dedicaron su tiempo para evaluar este trabajo, gracias a sus aportaciones enriquecieron significativamente este trabajo.

Resumen

El río Angulo es el mayor afluente del río Lerma en la margen izquierda de este, abastece de agua a los módulos de riego I y VII del Distrito de Riego 087, siendo vital para la actividad agrícola y ganadera de la región. Sin embargo, esta zona enfrenta problemas de sequías recurrentes que afectan la producción y la economía local.

En este estudio se busca analizar el riesgo de sequías a nivel local, con el propósito de ofrecer datos útiles para la gestión de este fenómeno climático extremo.

El análisis del peligro se realizó el uso de índices de sequía, obtenidos de manera *in-situ*, como el Índice de Precipitación Estandarizado y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado y de mediante información satelital, como el Índice de Salud Vegetal y el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación. Con estos índices se elaboró un monitor de sequías, facilitando el seguimiento y el análisis del fenómeno en la región.

Se evaluaron las vulnerabilidades sociales, económicas y ambientales, detectando limitaciones en la disponibilidad de datos, especialmente a nivel local y estatal, que dificultaron la precisión de algunos cálculos. Los resultados destacaron la variabilidad espacio-temporal de las sequías, así como la heterogeneidad del peligro y la vulnerabilidad en distintas localidades.

Los resultados de este estudio no solo validan la metodología empleada, sino que resaltan la necesidad de mantener actualizada la información sobre sequías y vulnerabilidades para la toma de decisiones efectivas frente a este fenómeno.

Palabras clave: Sequías, peligro, índices de sequía, vulnerabilidad, riesgo.

Abstract

The Angulo River is the largest tributary of the Lerma River on its left bank. It supplies water to irrigation modules I and VII of Irrigation District 087, making it vital for agricultural and livestock activities in the region. However, this area faces recurrent drought problems that impact production and the local economy.

This study aims to analyze the risk of drought at the local level, with the goal of providing useful data for the management of this extreme climatic phenomenon.

The hazard analysis was conducted using drought indices obtained in situ, such as the Standardized Precipitation Index and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, as well as satellite information, including the Vegetation Health Index and the Normalized Difference Vegetation Index. With these indices, a drought monitoring system was developed to facilitate the tracking and analysis of the phenomenon in the region.

Social, economic, and environmental vulnerabilities were evaluated, revealing limitations in data availability, particularly at the local and state levels, which hindered the accuracy of some calculations. The results highlighted the spatiotemporal variability of droughts, as well as the heterogeneity of hazard and vulnerability across different localities.

The findings of this study not only validate the methodology used but also emphasize the need to keep drought and vulnerability information up to date for effective decision-making in response to this phenomenon.

Contenido

1	Introducción.....	1
2	Justificación	3
3	Objetivo general	5
4	Objetivos particulares	5
5	Hipótesis.....	5
6	Antecedentes.....	6
7	Marco teórico	9
7.1	índices de sequía	9
7.2	Teledetección	9
7.3	Monitores de sequías existentes.	9
7.4	Peligro, vulnerabilidad y riesgo	10
8	Zona de estudio.....	12
8.1	Marco físico	13
8.2	Municipios	17
8.2.1	Población	18
9	Metodología	20
9.1	Recopilación y validación de información.....	21
9.1.1	Test de secuencias.....	22
9.1.2	Prueba de Helmert	22
9.1.3	Curva masa doble	23
9.1.4	Prueba estadística de la t de Student.....	23
9.1.5	Prueba estadística de Cramer	24
9.1.6	Prueba de Wald-Wolfowitz	26
9.1.7	Límites de Anderson.....	26
9.2	Peligro	27
9.2.1	Índices de sequía	27
9.2.1.1	Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	28
9.2.1.2	Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).....	30
9.2.1.3	Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI).....	31
9.2.1.4	Índice Satelital de Salud Vegetal (VHI)	32
9.2.2	Monitor de sequía	34

9.2.3	Probabilidad de ocurrencia	35
9.2.4	Asignación de pesos y clasificación de severidad	35
9.2.5	Índice de peligro ante sequías.....	36
9.3	Vulnerabilidad	37
9.3.1	Selección de factores.....	37
9.3.2	Estandarización de factores	39
9.3.3	Promedio ponderado de factores	40
9.3.4	Índice de vulnerabilidad ante sequías.....	41
9.4	Riesgo	41
10	Resultados y discusión.....	43
10.1	Estaciones meteorológicas.....	43
10.2	Índices de sequía.....	46
10.3	Monitor de sequías	55
10.4	Vulnerabilidad	57
10.4.1	Vulnerabilidad ambiental	57
10.4.2	Vulnerabilidad social	67
10.4.3	Vulnerabilidad económica.....	79
10.4.4	Vulnerabilidad global	88
10.5	Riesgo	89
11	Conclusiones.....	95
12	Líneas futuras de investigación.....	97
13	Referencias	98
	Anexos.....	110
a)	Código para el cálculo del SPI y SPEI	110
b)	Código para la determinación del peligro	115
c)	Correlación del SPI <i>in situ</i> con SPI satelital.....	117

Índice de tablas

Tabla 1. Población por municipio (INEGI, 2020).....	19
Tabla 2. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.....	22
Tabla 3. Grados de Libertad para la distribución t de Student (Campos Aranda, 1998).....	24
Tabla 4. Clasificación del SPI (Mckee et al., 1993).....	30
Tabla 5. Clasificación del NDVI (Cherlinka, 2020).....	32
Tabla 6. Clasificación de VCI (Kogan, 1995a).....	33
Tabla 7. Indicadores propuestos por CONAGUA (2022), agrupados en los tipos y componentes de la vulnerabilidad ante sequía.....	37
Tabla 8. Categorías para clasificar el grado de vulnerabilidad ante la sequía (Ortega-Gaucin et al., 2018).	41
Tabla 9. Listado de estaciones meteorológicas para la cuenca del río Angulo, obtenidas de la base de datos del SMN (CONAGUA, 2023c).....	43
Tabla 10. Estaciones seleccionadas con los resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia.	45
Tabla 11. Área erosionada por municipio.....	60
Tabla 12. Área de cobertura vegetal por municipio.....	62
Tabla 13. Normalización de indicadores ambientales.	64
Tabla 14. Ponderación de los indicadores ambientales	66
Tabla 15. Ponderación de indicadores sociales.....	78
Tabla 16. Valor de la producción agrícola de riego y temporal.....	82
Tabla 17. Valor de la producción del ganado en pie.....	83
Tabla 18. Longitud de caminos por municipio.	85
Tabla 19.Normalización de indicadores económicos.	86
Tabla 20. Ponderación indicadores económicos.	87

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del sistema Lerma-Chapala (Cruz Gutiérrez et al., 2017).	3
Figura 2. Ubicación de los módulos de riego del distrito de riego 087 (Cruz Gutiérrez et al., 2017).....	4
Figura 3. Sequías en México al 15 agosto de 2024 (SMN, 2024)	8
Figura 4. Ubicación de la cuenca del río Angulo en la R.H. VIII.	12
Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Angulo en el estado de Michoacán.	13
Figura 6. Elevaciones de la cuenca del río Angulo(INEGI, 2023a).	14
Figura 7. Cobertura y usos de suelo en la cuenca del río Angulo(INEGI, 2021).	15
Figura 8. Climas en la cuenca del río Angulo(García, 1998).	17
Figura 9. Municipios dentro de la cuenca del río Angulo.	18
Figura 10. Esquema metodológico para determinar el riesgo ante sequías.	20
Figura 11. Puntuaciones de peso y clasificación basadas en la distribución de probabilidad acumulada normal de SPI (Dabanli, 2018).....	36
Figura 12. Ubicación de las estaciones meteorológicas (CONAGUA, 2023c).	43
Figura 13. Polígonos de Thiessen en la cuenca del río Angulo.	46
Figura 14. SPI a un mes para la estación 16050.	46
Figura 15. SPEI a un mes para la estación 16050.	47
Figura 16. SPI a tres meses para la estación 16050.....	47
Figura 17. SPI a tres meses para la estación 16050.....	48
Figura 18. Simbología del mapeo del SPI y SPEI (McKee et al., 1993)	49
Figura 19. Mapas de extensión del SPI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.....	49
Figura 20. Mapas de extensión del SPEI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.....	50
Figura 21. Simbología utilizada para el mapeo del NDVI (Cherlinka, 2020).	51
Figura 22. Mapas de extensión del NDVI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.....	52
Figura 23. VCI obtenido en la plataforma GEE para diciembre del 2017	53
Figura 24. TCI obtenido en la plataforma GEE para diciembre del 2017	53
Figura 25. Simbología utilizada para el mapeo del VHI (Kogan, 1995a).	54
Figura 26. Mapas de extensión del VHI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.....	55
Figura 27. Simbología utilizada para el mapeo del monitor de sequías.....	56

Figura 28. Monitor de Sequías para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.	56
Figura 29. Cuencas dentro de la zona de estudio (CONAGUA, 2023b).	57
Figura 30. Acuíferos en la cuenca del río Angulo (CONAGUA, 2023a).....	58
Figura 31. Áreas afectadas por erosión (INEGI, 2013).....	59
Figura 32. Incendios forestales y áreas afectadas por incendios foréstales en la cuenca del río Angulo (CONAFOR, 2023).	61
Figura 33. Área de cobertura vegetal de la cuenca (INEGI, 2021).	62
Figura 34. Áreas naturales protegidas dentro de la cuenca del río Angulo (CIBIOGEM, s.f.).	63
Figura 35. Vulnerabilidad ambiental en la cuenca del río Angulo.	67
Figura 36. Localidades dentro de la cuenca del río Angulo (INEGI, 2020)...	68
Figura 37. Condiciones de pobreza dentro de la cuenca (INEGI, 2020).....	69
Figura 38. Población sin afiliación a servicios de salud dentro de la cuenca (INEGI, 2020).	70
Figura 39. Población analfabeta dentro de la cuenca del río Angulo (INEGI, 2020).....	71
Figura 40. Viviendas sin servicio de agua entubada (INEGI, 2020).	72
Figura 41. Viviendas sin drenaje (INEGI, 2020).	73
Figura 42. Viviendas sin excusado (INEGI, 2020).....	74
Figura 43. Viviendas sin energía eléctrica (INEGI, 2020).	75
Figura 44. Viviendas con piso de tierra (INEGI, 2020).....	76
Figura 45. Años promedio de escolaridad (INEGI, 2020).	77
Figura 46. Vulnerabilidad social en la cuenca del río Angulo.	79
Figura 47. Densidad de población (hab/km ²) (INEGI, 2020)	80
Figura 48. Población económicamente activa desocupada (INEGI, 2020).81	
Figura 49. Valor de la producción agrícola de riego y temporal (INEGI, 2022).	82
Figura 50. Valor de la producción del ganado en pie (INEGI, 2022)	83
Figura 51. Red vial en la cuenca del río Angulo (INEGI, 2023b).	84
Figura 52. Vulnerabilidad económica en la cuenca del río Angulo.....	88
Figura 53. Vulnerabilidad global en la cuenca del río Angulo.	89
Figura 54. Simbología utilizada para el mapeo del riesgo.	90
Figura 55. Riesgo ambiental supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.....	91
Figura 56. Riesgo social supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.92	
Figura 57. Riesgo económico supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.....	93
Figura 58. Riesgo global supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.	94
Figura 59. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i>	117

Figura 60. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2001.....	118
Figura 61. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2002.....	118
Figura 62. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2004.....	119
Figura 63. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2005.....	119
Figura 64. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2006.....	120
Figura 65. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2008.....	120
Figura 66. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2009.....	121
Figura 67. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2010.....	121
Figura 68. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2011.....	122
Figura 69. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2012.....	122
Figura 70. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2013.....	123
Figura 71. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2014.....	123
Figura 72. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2015.....	124
Figura 73. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2016.....	124
Figura 74. Correlación SPI satelital vs SPI <i>in situ</i> para el año 2017.....	125

1 Introducción

Las sequías constituyen uno de los fenómenos naturales más perjudiciales, las dejan a su paso efectos devastadores en múltiples sectores. Desde la agricultura, donde se ven afectados tanto los cultivos como el ganado, hasta los recursos hídricos, que limitan la disponibilidad de agua esencial para las comunidades y los ecosistemas. Además, su impacto en el medio ambiente se manifiesta en la disminución de biodiversidad y en cambios en los hábitats naturales. Estas consecuencias destacan la necesidad de adoptar acciones concretas para reducir sus impactos y adaptarnos a los desafíos que presentan. (Dow, 2010; Popova et al., 2014; Yu et al., 2014). Este fenómeno empieza de forma lenta, pero puede tomar mucho tiempo y puede cubrir una gran área en comparación a otros eventos naturales extremos como las inundaciones (Rossi et al., 1992; Mishra & Singh, 2010a; Di Lena et al., 2014). Se espera que, en el futuro, las sequías ocurran con mayor frecuencia e impacto debido al cambio climático (Trenberth et al., 2014).

Las sequías se pueden clasificar como meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Dracup et al., 1980; Orville, 1990; Wu et al., 2016). La meteorológica es el tipo de sequía más importante (Nasrollahi et al., 2018) debido a que esta puede impulsar los otros tipos de sequías. Los efectos de la sequía meteorológica aparecen y diferentes formas de sequía pueden presentarse, cada una con características y consecuencias particulares se presentarán de forma paulatina, provocando impactos combinados que pueden causar impactos destructivos en el área (Heydari Alamdarloo et al., 2020).

Cerca del 50 % de la tierra es vulnerable a las sequías (Kogan, 1997). De acuerdo con la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT), más de 200 millones de personas han sido afectadas y 11 millones han muerto por sequías entre 1900 y 2016 en el mundo (Guha-Sapir, 2017).

En México, Las sequías ocurren de manera habitual y su distribución no es homogénea en todo el país, gracias a la influencia de varios patrones climáticos a gran escala. Entre estos, destacan fenómenos como El Niño Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO). Estos patrones atmosféricos juegan un papel crucial en el clima nacional, afectando tanto la intensidad como la duración de las sequías en distintas regiones. (Florescano, 2000).

A través de la historia de México, se han documentado múltiples episodios de sequías que han causado graves impactos en la sociedad y en la

economía. Por tanto, el estudio de las sequías con antelación podría reducir los efectos nocivos que estas provocan, así como tomar medidas paliativas cuando se está cruzando por una sequía.

Como un evento regional, las sequías necesitan ser monitoreadas no solamente de manera puntual sino espacial, y los niveles del detalle de los índices *in-situ* están influenciados por la concentración y la distribución del sitio (Kogan, 1997; Anderson et al., 2011; Hao et al., 2015). La información obtenida a través de percepción remota puede proveer de manera sistemática y continua información tanto de vegetación como del ciclo del agua, por lo que los índices de percepción remota de sequías pueden superar los inconvenientes que presentan los índices de sequía *in-situ* y aplicarlos de forma apropiadamente en un monitor de sequías espacial (Xu et al., 2018).

En este estudio se plantea una metodología con la estudiar el riesgo ante sequías a escala de localidad, tomando como área de investigación la cuenca del río Angulo, la cual pertenece al sistema Lerma-Chapala. Esto mediante la evaluación de diversos índices que permiten evaluar las distintas características de una sequía, como los es el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), el Índice de Salud Vegetal (VHI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

2 Justificación

De acuerdo con Ortega-Gaucin et al., (2018), los estados de la República Mexicana donde existe una mayor probabilidad de sufrir de sequías son los del norte y los de la altiplanicie, donde se encuentra la cuenca del río Angulo, siendo este el mayor afluente del río Lerma en su margen izquierda (Figura 1).

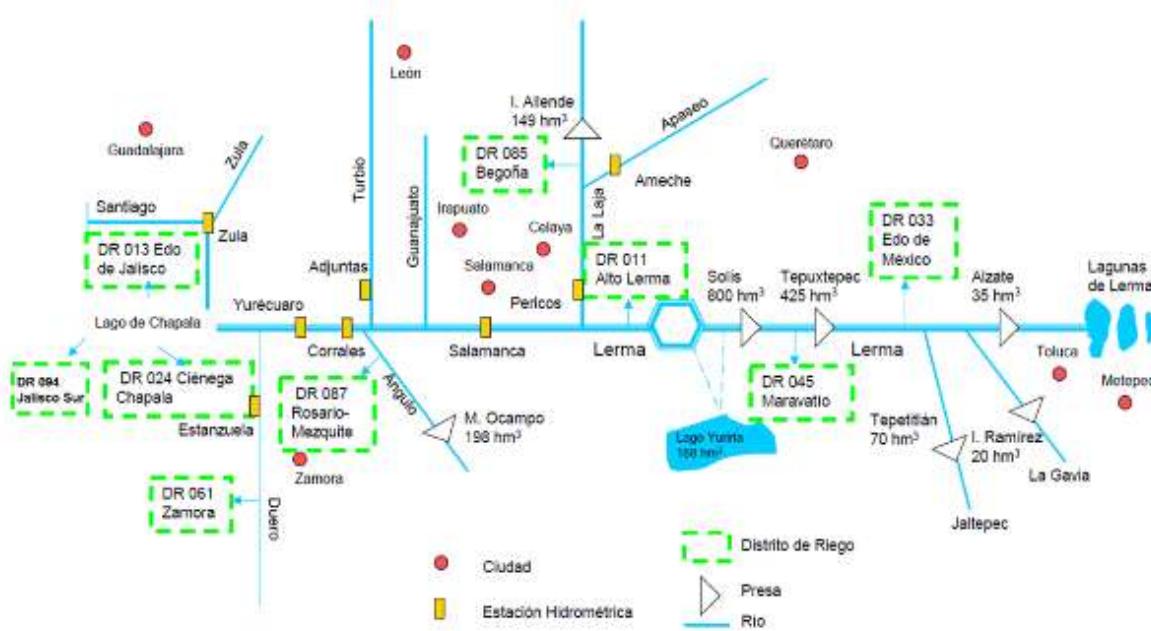


Figura 1. Diagrama del sistema Lerma-Chapala (Cruz Gutiérrez et al., 2017).

El río Angulo fluye de sur a norte a lo largo de 64 km, comenzando en la laguna de Zacapu (Andrade-Servín & Israde-Alcántara, 2021). A unos 8 km río arriba de su desembocadura se encuentra la presa Melchor Ocampo, con una capacidad de 200 Mm³ y un área de drenaje es de 2063 km² (Cruz Gutiérrez et al., 2017). En términos administrativos, el río Angulo forma parte de la región Lerma dentro la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

Tanto el río Angulo como la presa Melchor Ocampo abastecen a los módulos I: Angamacutiro, con un área de 7689 ha y 2116 usuarios; y VII: Zacapu, con un área de 11160 ha y 3834 usuarios. Ambos pertenecientes al distrito de riego 087, Rosario Mezquite (Cruz Gutiérrez et al., 2017) (Figura 2).

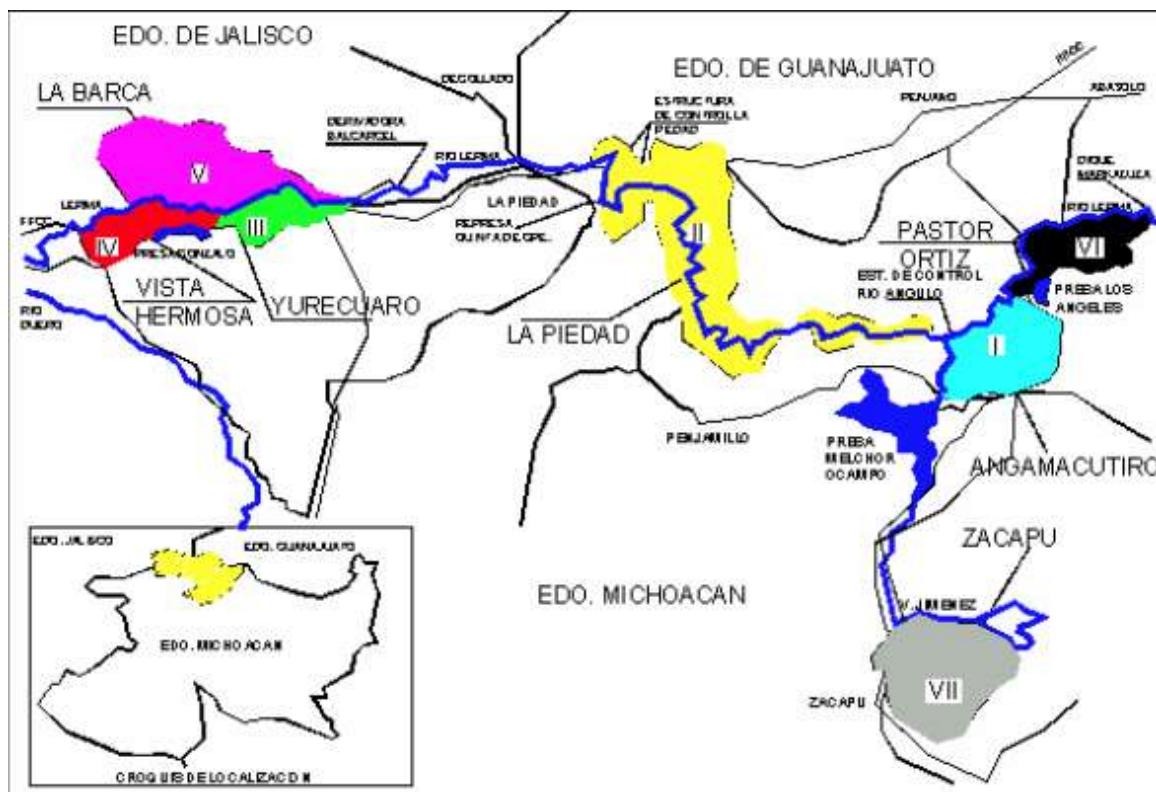


Figura 2. Ubicación de los módulos de riego del distrito de riego 087 (Cruz Gutiérrez et al., 2017).

Conforme al Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), el módulo I, “Asociación de Usuarios de Riego del Valle de Angamacutiro A.C.”, recibe un volumen de agua subterránea de 6.30 Mm³ y un volumen superficial, de la presa Melchor Ocampo, de 37.79 Mm³; el módulo VII, “Asociación de Usuarios Ciénega de Zacapu A.C.”, recibe un volumen de 55.36 Mm³ únicamente de aguas superficiales (Cruz Gutiérrez et al., 2017).

De acuerdo con los agricultores que utilizan los módulos de riego, estos suelen presentar déficit en el recurso hídrico, por lo que es importante caracterizar las sequías en la zona para implementar estrategias adecuadas para solucionar este problema.

3 Objetivo general

Evaluar el riesgo ante sequías a escala de localidad en la cuenca del río Angulo, con el propósito de obtener información fundamental para la gestión de eventos extremos en la región.

4 Objetivos particulares

- Caracterizar la zona de estudio.
- Determinar índices adecuados para caracterizar y medir la magnitud de las sequías.
- Evaluar la amenaza ante sequías mediante el uso de diversos índices.
- Determinar la vulnerabilidad social, económica, ambiental y global ante sequías.
- Evaluar el riesgo de sequías mediante la integración de datos sobre amenaza, vulnerabilidad y exposición.

5 Hipótesis

Se espera que en la cuenca del río Angulo existan diferencias significativas en cuestión del riesgo ante sequías entre los municipios que la componen, debido a las variaciones de los factores locales. Además, también se espera que la evaluación a escala de cuenca y municipal revelará patrones y áreas de mayor vulnerabilidad a las sequías, contribuyendo a una mejor compresión y gestión del riesgo en la región.

6 Antecedentes

A lo largo de la historia, en México se han presentado largos períodos de sequías severas, durante períodos de intensos enfrentamientos sociales en la nación (Domínguez, 2016). La sequía ha jugado un papel crucial, e incluso decisivo, en acontecimientos políticos trascendentales de nuestra historia, como la Independencia y la Revolución, dado que ambos procesos surgieron en épocas marcadas por este fenómeno climático (Florescano, 2000).

Se tienen registros de sequías en la República Mexicana desde la época prehispánica, donde se puede destacar una ocurrida durante la mitad del siglo XV (1438-1460), en el centro de México se vivió un período referido como "megasequía" (Sánchez-Mora, 1980).

Durante la época colonial se comenzaron a tomar medidas paliativas y de largo plazo para mitigar los impactos de las sequías (Domínguez, 2016). Entre 1785 y 1786 ocurrió la sequía de mayor severidad durante la época colonial, abarcando casi todo el territorio perteneciente al territorio novohispano. A partir de ella comenzó una crisis socioeconómica que duraría aproximadamente 20 años, inclusive se podría considerar parte de las razones por las que ocurrió el inicio de la Guerra de Independencia (CONAGUA, 2014).

En el período independiente se registraron diferentes sequías que afectaron los cultivos del país, esta afectación a la agricultura tuvo repercusiones en la economía, siendo en este período cuando Estados Unidos comenzó a exportar cereales a México (Domínguez, 2016). Para Florescano (2000) hay un vínculo significativo entre el comienzo de la Revolución y una sequía de tres años que impactó a los estados de Querétaro, Hidalgo, Chihuahua y Nuevo León, que son precisamente las regiones donde nació el movimiento revolucionario.

Durante la segunda mitad del siglo pasado las sequías comenzaron a abordarse de forma programática, estableciendo planes o programas gubernamentales; durante esta etapa comenzaron a construirse grandes presas en México (Domínguez, 2016). Entre los años 1925 y 1977, ocurrieron 7 sequías de intensidad extrema, específicamente las de 1925, 1935, 1957, 1960, 1962, 1969 y 1977 (Sancho y Cervera et al., 1977).

Entre 1919 y 1977 se registraron de 38 eventos de sequías, de las cuales 20 fueron clasificadas como severas y siete como extremadamente severas. De

estas, 17 guardan una relación directa sequías de escala mundial, como la de 1951, que afectó a Oceanía, Europa y Asia; la de 1956, que impactó a Europa, Asia y América; y la de 1972, que tuvo efectos en Oceanía, Asia y América (CONAGUA, 2014). Posteriormente, en 1979, se presentó una sequía que afectó con gran intensidad en zonas reducidas, especialmente en la región de Lerma (SARH, 1981).

En el año 2011, México enfrentó una de las sequías más intensas de su historia, que impactó gravemente a los estados del norte y centro del país, abarcando 1213 municipios en 19 estados (DOF, 2012). Este evento es considerado el más significativo en las últimas siete décadas, ya que impactó al 60 % del territorio nacional. Aunque 2010 fue conocido como "el año más lluvioso del que se tenga registro", el déficit hídrico continuó (Domínguez, 2016). Esto se debió, aparentemente, a que el consumo de agua durante la sequía de 2009 y parte de 2010 superó con creces la capacidad de recarga que las lluvias podían ofrecer (Alatorre, 2010). Como resultado, cuando se presentó un nuevo episodio de sequía en 2011, la escasez de agua se hizo sentir con mucha más intensidad.

Particularmente para el estado de Michoacán, entre el periodo de mayo de 1999 a marzo del 2000, se suscitó una sequía prolongada y atípica, declarada Desastre Natural para efectos de las Reglas de Operación del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) (DOF, 2000).

Desde el 2003, año en que se creó el monitor de sequías de América del Norte (NADM), se han registrado alrededor de 10 periodos de sequía en los municipios que están dentro de la cuenca del río Angulo, siendo el periodo más largo de 5 años y 6 meses, comprendido entre las fechas del 15 de abril del 2017 hasta el 15 de septiembre del 2021. Dentro de este periodo se presentaron 5 meses extremadamente secos, la sequía más severa que se presentó en estos municipios. La última sequía registrada en la zona inició el 30 de noviembre del 2022, presentándose una sequía extrema desde la segunda quincena del mes de junio del 2023 hasta la primera quincena de agosto del 2024 (Figura 3); en la segunda quincena de agosto del 2024 la zona se presentó sin sequías y se ha mantenido hasta el momento, (Sistema Meteorológico Nacional, 2024).

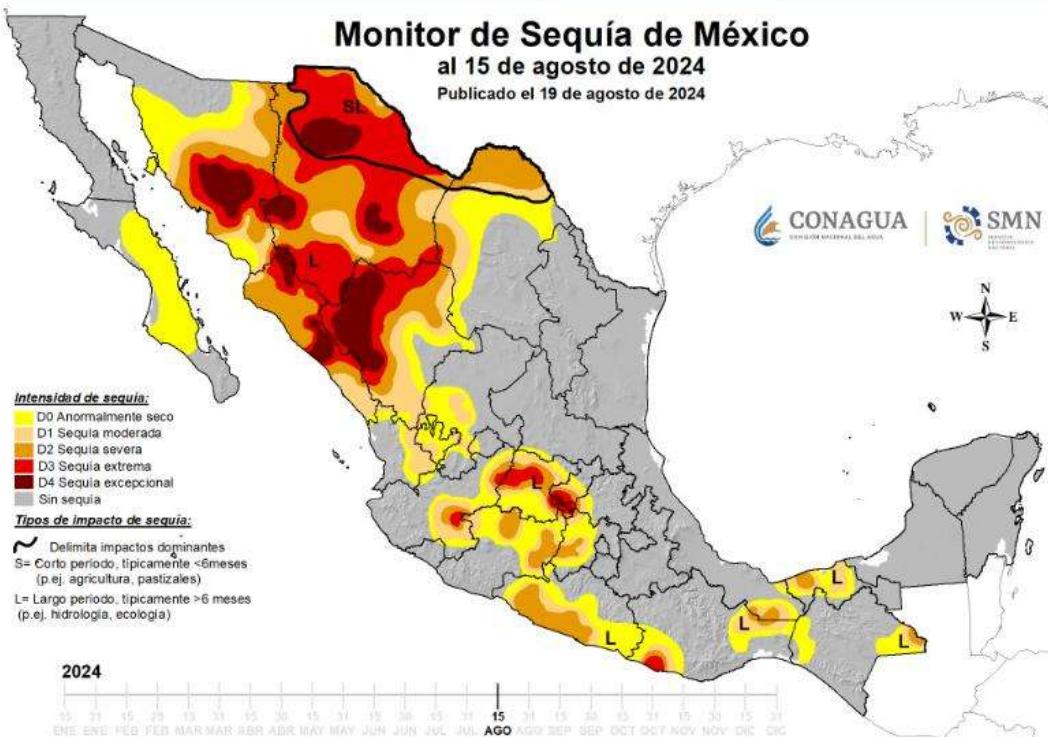


Figura 3. Sequías en México al 15 agosto de 2024 (SMN, 2024).

Debido a las pocas precipitaciones que se presentaron en el año 2022 en la entidad, en 2023, 22 presas con mayor capacidad en el estado registraban un almacenamiento que fluctuaba entre el 55 y 60 %, suficiente para suministrar el líquido en todo Michoacán (Ruiz, 2023).

7 Marco teórico

7.1 Índices de sequía

En el marco de los intentos por comprender, analizar y supervisar de forma estructurada y precisa la sequía, se han establecido índices que representan medidas cuantitativas basadas en una o varias variables meteorológicas, hidrológicas u otras. Estos índices ayudan a simplificar las complejas interacciones entre factores como el clima, la humedad del suelo, la salud de la vegetación y otros elementos, integrándolos a través de diversas metodologías (Tsakiris et al., 2007). Esto facilita la comunicación efectiva de la información sobre anomalías climáticas y permite evaluar estas anomalías considerando su intensidad, duración, recurrencia y extensión geográfica (Méndez, 2013).

7.2 Teledetección

La teledetección representa una herramienta invaluable valiosa para identificar características del terreno que son difíciles de alcanzar con métodos tradicionales. Su funcionamiento se basa en cómo la energía electromagnética interactúa con las superficies terrestres, las cuales reflejan la luz de manera diferente dependiendo del momento en que se toma la imagen (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006; Gonzaga Aguilar, 2015). Entre las técnicas que se derivan del estudio de imágenes satelitales multiespectrales, los índices de vegetación son especialmente destacados. Estos índices son transformaciones matemáticas que combinan los niveles digitales capturados en dos o más bandas espectrales de una misma imagen (Speranza & Zerda, 2002; Gonzaga Aguilar, 2015).

Para este trabajo se utilizó la herramienta MODIS (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) del satélite Terra de la NASA. Las imágenes se trabajaron mediante la Plataforma Google Earth Engine (GEE), se usaron las colecciones de imágenes MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061(Didan, 2021) y MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 (Wan, 2021).

7.3 Monitores de sequías existentes.

Los monitores de sequías existentes en varias partes del mundo sirven para diferentes propósitos de acuerdo con la posición geográfica y el tamaño de

la región (Trnka et al., 2020). A escala nacional, el monitor de sequías de Estados Unidos fue el pionero y ha estado en operación desde 1995 (Svoboda et al., 2002). Esto ha inspirado muchos proyectos alrededor del mundo. A escala continental se cuenta con el monitor de sequías de Norteamérica, que es un derivado del monitor de Estados Unidos, así mismo Europa y África cuenta con uno propio (Trnka et al., 2020).

El lapso de estos monitores va desde un rango de un par de meses a un mes, y en cuanto a la resolución espacial va desde kilómetros cuadrados hasta cientos de kilómetros cuadrados (Trnka et al., 2020).

Generalmente son usados dos enfoques principales para determinar la presencia de sequías en un territorio dado: el primer enfoque se basa en un conjunto de indicadores preseleccionados (como el Monitor Global de Sequías, que usa SPEI) o los modelos basados en procesos (por ejemplo el Monitor de Sequías Alemán, que usa la humedad del suelo) y; el segundo utiliza la convergencia de evidencia, que generalmente se lleva a cabo por el trabajo de expertos que no sólo consideran datos meteorológicos y las herramientas satelitales, sino también toman en cuenta los impactos observados (por ejemplo el Monitor de Sequías de Estados Unidos) (Trnka et al., 2020).

7.4 Peligro, vulnerabilidad y riesgo

Las definiciones de vulnerabilidad y riesgo cambian dependiendo de la perspectiva. (Wisner et al., 1994) define el riesgo como un resultado de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad. En el caso de las sequías, múltiples estudios usan una definición similar para la evaluación del riesgo (Dabanli, 2018).

En años recientes se ha adoptado un enfoque orientado al riesgo para la gestión de desastres (Tonini et al., 2012; Skakun et al., 2014). El análisis del riesgo asociado a las sequías es una función de dos argumentos: el peligro y la vulnerabilidad (Jonkman et al., 2003; IPCC, 2007; Jayanthi et al., 2013), aunque en algunas investigaciones también agregan la exposición (Ahmadalipour & Moradkhani, 2018; Liu & Chen, 2021).

La evaluación del peligro ante sequías es el aspecto vital del riesgo (Hao et al., 2012), lo que significa determinar la probabilidad de la intensidad y la frecuencia del fenómeno (Zhang & Zhang, 2016). El peligro describe los aspectos físicos de la sequía y funciona como la conexión entre el riesgo y la vulnerabilidad (He et al., 2011). Por lo tanto, la amenaza es el elemento

más significativo del riesgo ante sequía (Hao et al., 2012). El peligro es la posibilidad de que se presente una sequía. El índice de peligro se calcula mediante el análisis estadístico de índices como el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), el Índice de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), el Índice de Salud Vegetal (VHI), entre otros (Heydari Alamdarloo et al., 2020).

La vulnerabilidad se relaciona a la sensibilidad potencial humana y natural de un área cuando ocurre una sequía. En otras palabras, las diferencias entre las propiedades naturales y las características socioeconómicas provocan una sensibilidad diferente cuando se presenta una sequía (Santos et al., 2000). Existen diferentes formas de medir la vulnerabilidad ante sequías, uno de los métodos más comunes es la evaluación de vulnerabilidad basada en índices. Para cuantificarla, el índice depende de otros índices potenciales y los combina con los grados de vulnerabilidad relacionados (Heydari Alamdarloo et al., 2020), este procedimiento se ha utilizado a escala local y global (Leichenko & O'Brien, 2002; Vincent, 2004; Ashok & Sasikala, 2012).

8 Zona de estudio

El río Angulo pertenece a la región hidrológica-administrativa VIII, conocida como Lerma-Santiago-Pacífico, y es reconocido como uno de los afluentes clave del río Lerma. (Figura 4). Su origen se debe a la descarga de manantiales, siendo especialmente notables aquellos que alimentan las lagunas de Zacapu y Tarejero, ya que tienen un caudal considerable. Entre sus principales afluentes se encuentra el río La Patera, que se une al río Angulo justo antes de llegar a Villa Jiménez, por el margen derecho (CONAGUA, 2007).

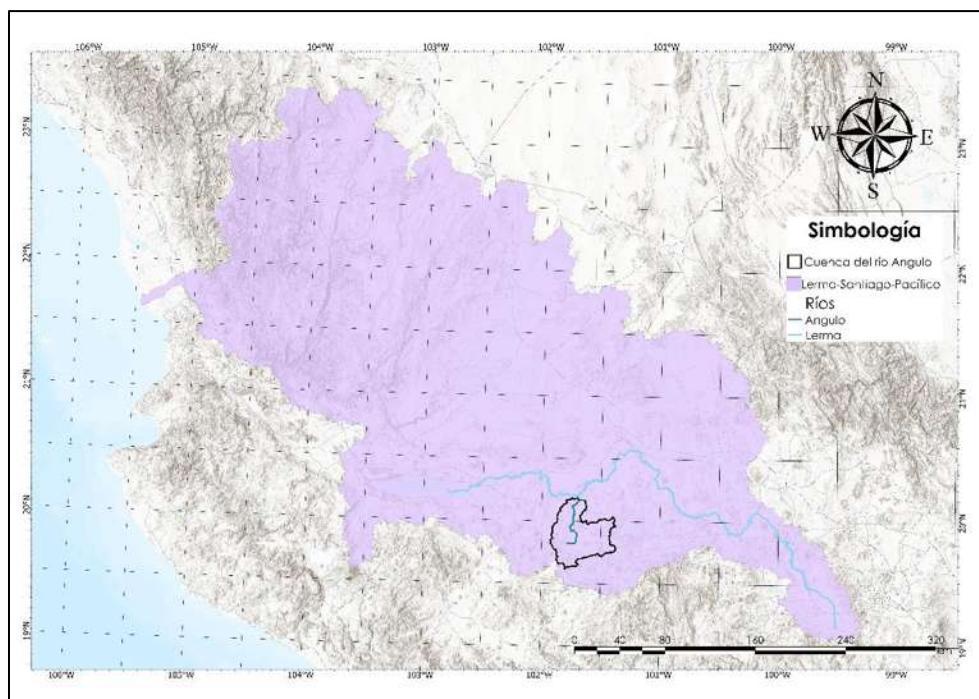


Figura 4. Ubicación de la cuenca del río Angulo en la R.H. VIII.

La cuenca del río Angulo se ubica en la frontera norte del estado de Michoacán de Ocampo y cuentan con un área estimada de 2064 km² (Figura 5).

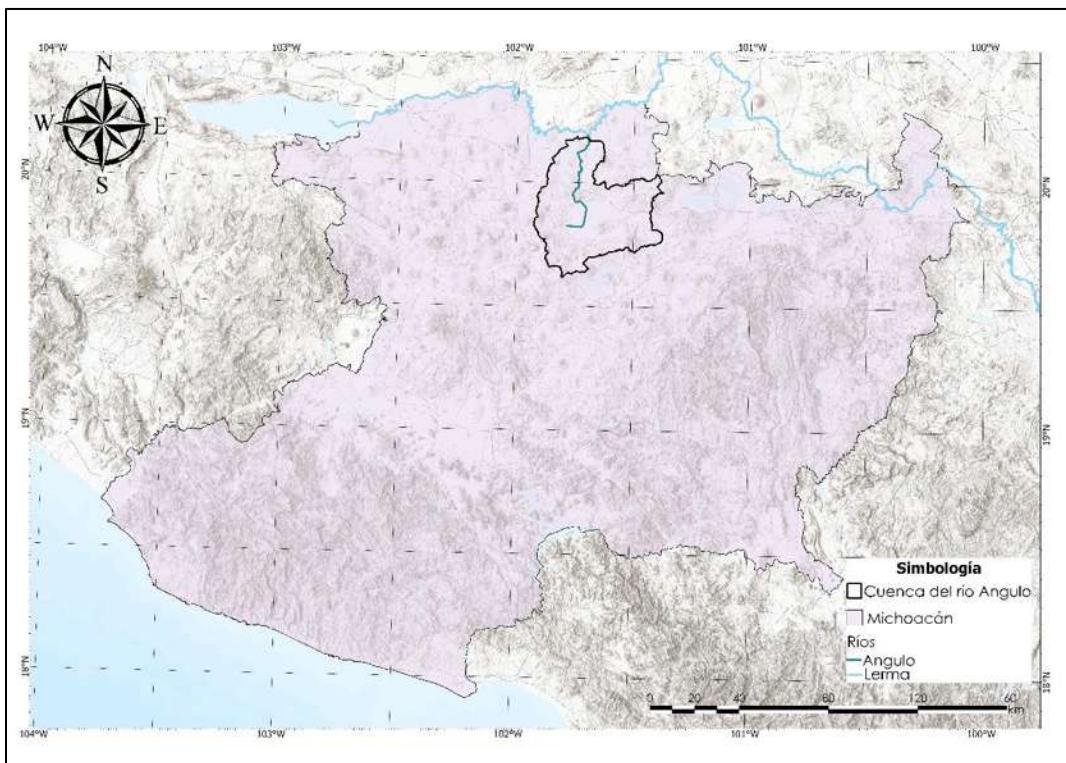


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Angulo en el estado de Michoacán.

8.1 Marco físico

La parte alta de la cuenca se encuentra en el cerro de Nahuatzen, mientras que la zona media abarca principalmente la ciénaga de Zacapu. Por su parte, la zona baja se localiza en el municipio de Angamacutiro. La cuenca presenta un desnivel de 1695 metros, con una altitud máxima de 3374 msnm y una mínima de 1679 msnm (Madrigal Barrera et al., 2015) (Figura 6).

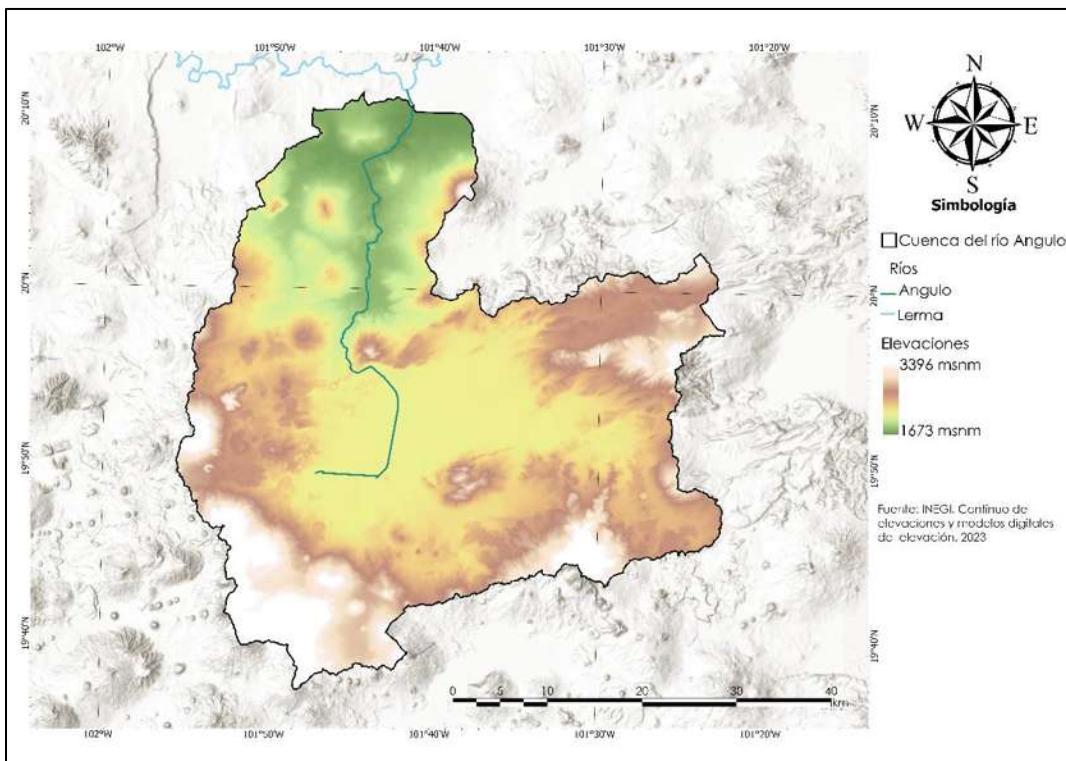


Figura 6. Elevaciones de la cuenca del río Angulo (INEGI, 2023a).

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes en la zona de estudio, lo que se refleja en que el uso predominante del suelo también es agrícola. En las zonas superior y central de la cuenca, predominan zonas de bosque compuestas principalmente por pino y pino-encino, mientras que en la parte baja se encuentran matorrales subtropicales (Figura 7).

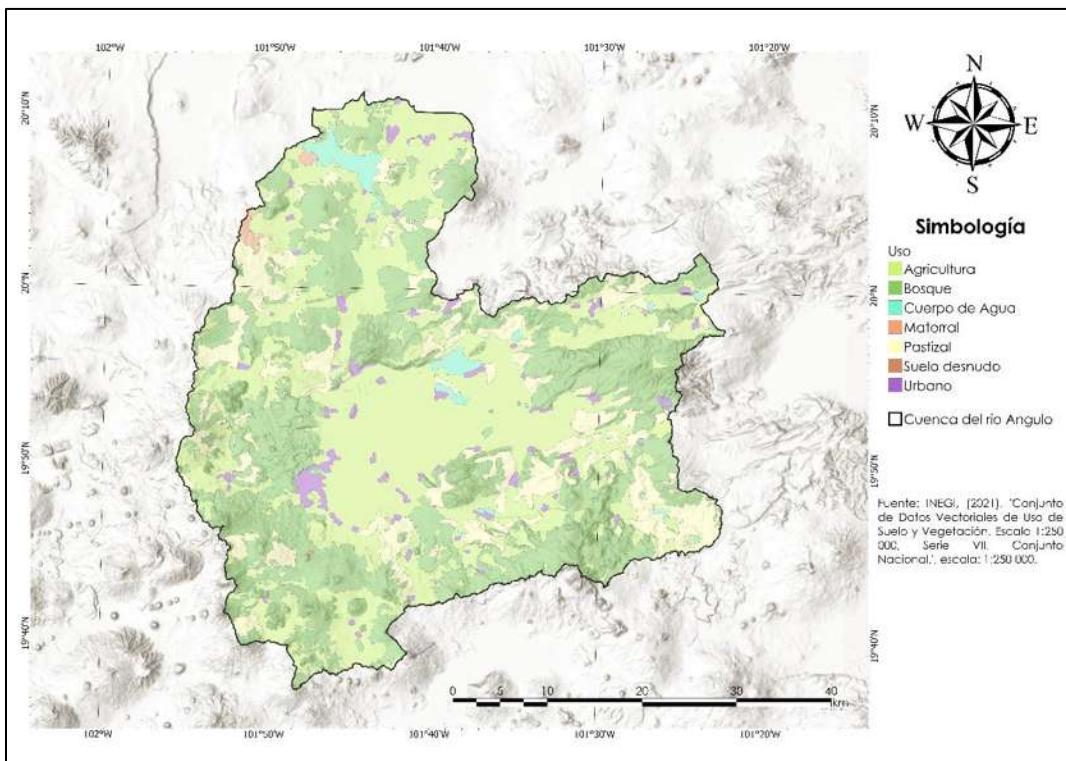


Figura 7. Cobertura y usos de suelo en la cuenca del río Angulo(INEGI, 2021).

De acuerdo con la clasificación de Köppen adaptada por García (1981), en el área analizada se identifican cinco tipos de clima, predominando el clima templado (Figura 8). En el área norte se encuentra una región de clima semicálido, mientras que en la parte sur predomina un clima semifrío. Los distintos tipos de clima presentes en la cuenca son:

(A)C(wo): Este tipo climático corresponde a un semicálido subhúmedo dentro del grupo C. Se caracteriza por una temperatura media anual que supera los 18 °C, con el mes más frío por debajo de los 18 °C y el mes más cálido con temperaturas superiores a los 22 °C. La precipitación mensual más baja es inferior a 40 mm, mientras que las lluvias predominan en verano, con un índice P/T menor a 43.2. Además, la lluvia durante el invierno representa entre el 5 % y el 10.2 % del total anual.

(A)C(w1): Este clima corresponde a un semicálido subhúmedo dentro del grupo C. Se distingue por una temperatura media anual superior a 18 °C, con el mes más frío por debajo de esta temperatura y el más cálido superando los 22 °C. Las precipitaciones del mes más seco son menores a 40 mm. Las lluvias predominan en verano, con un índice P/T que oscila entre

43.2 y 55, mientras que las precipitaciones invernales representan entre el 5 % y el 10.2 % del total anual.

C(w1): Este tipo de clima es templado y subhúmedo, con una temperatura media anual que varía entre 12 °C y 18 °C. La temperatura del mes más frío oscila entre -3 °C y 18 °C, mientras que en el mes más cálido no supera los 22 °C. Las precipitaciones en el mes más seco son inferiores a 40 mm, predominando las lluvias en verano con un índice P/T de entre 43.2 y 55. La lluvia durante el invierno representa entre el 5 % y el 10.2 % del total anual.

C(w2): Este clima es templado y subhúmedo, con una temperatura media anual que oscila entre 12 °C y 18 °C. La temperatura del mes más frío se sitúa entre -3 °C y 18 °C, mientras que en el mes más cálido no supera los 22 °C. La precipitación del mes más seco es inferior a 40 mm. Las lluvias se concentran principalmente en verano, con un índice P/T superior a 55, y las precipitaciones invernales representan entre el 5 % y el 10.2 % del total anual.

Cb'(w2): Este clima es semifrío y subhúmedo, caracterizado por un verano fresco y prolongado. La temperatura media anual se encuentra entre 5 °C y 12 °C, con el mes más frío en un rango de -3 °C a 18 °C, mientras que la temperatura del mes más cálido no supera los 22 °C. La precipitación en el mes más seco es inferior a 40 mm, predominan las lluvias de verano, y las precipitaciones invernales constituyen entre el 5 % y el 10.2 % del total anual.

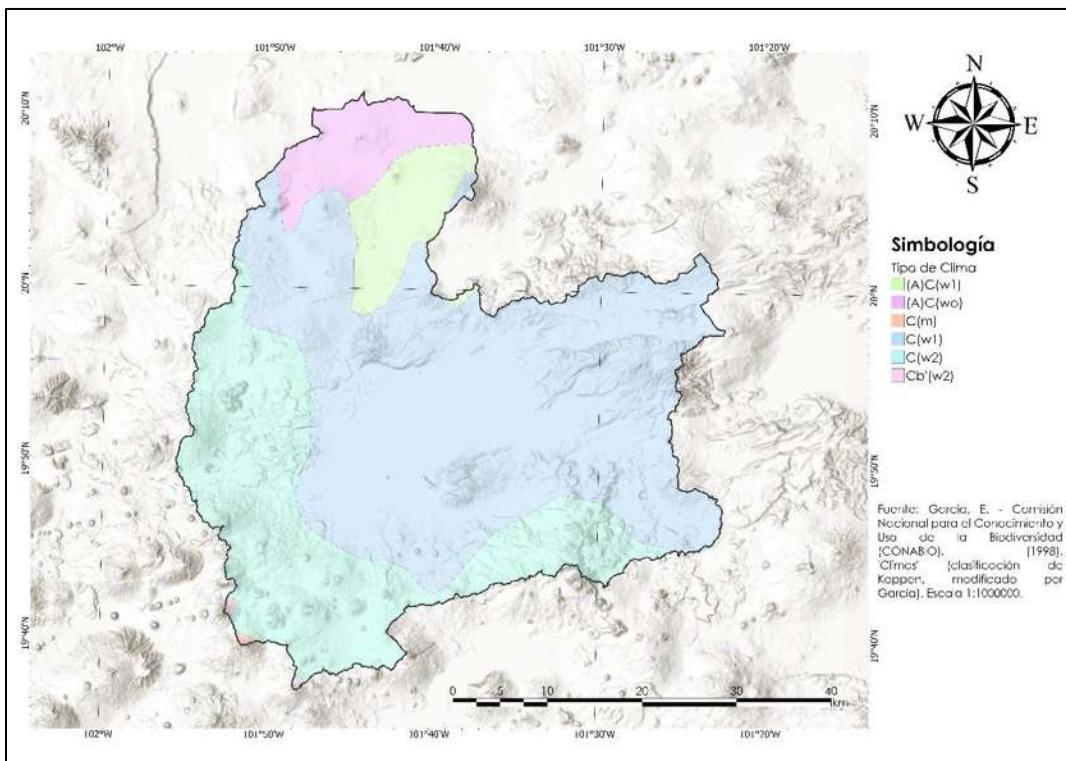


Figura 8. Climas en la cuenca del río Angulo(García, 1998).

8.2 Municipios

Dentro de la cuenca del río Angulo se encuentran los municipios de Angamacutiro, Coeneo, Chucándiro, Erongarícuaro, Huaniqueo, Jiménez, Morelia, Morelos, Nahuátzen, Panindícuaro, Penjamillo, Purépero, Puruándiro, Quiroga y Zacapu (Figura 9).

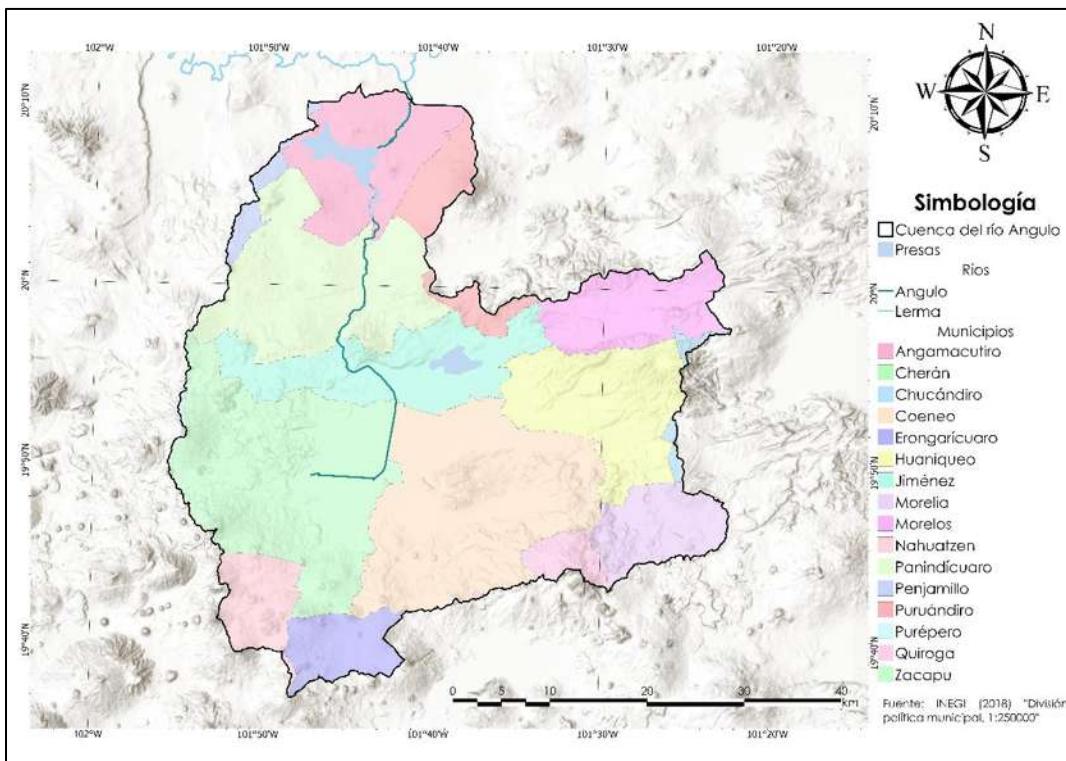


Figura 9. Municipios dentro de la cuenca del río Angulo (INEGI, 2018).

8.2.1 Población

Conforme al censo de población y vivienda del 2020, dentro de la cuenca se ubican 198 localidades, en las cuales habitan un aproximado de 163075 habitantes (INEGI, 2020).

El 19.2 % de las localidades corresponden al municipio de Coeneo, el 15.7 % a Zacapu, 13.6 % a Panindícuaro, 12.6 % a Huaniqueo, 12.1 % a Jiménez, 10.1 % a Morelos, y 9.6, 4, 1.5, 1 y 0.5 % a los de Angamacutiro, Morelia, Puruándiro, Erongarícuaro y Nahuátzen, respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Población por municipio (INEGI, 2020).

Municipio	Población total dentro de la cuenca (hab)
Angamacutiro	13301
Coeneo	20952
Erongarícuaro	1069
Huaniqueo	7944
Jiménez	12919
Morelia	4132
Morelos	5709
Nahuátzan	1507
Panindícuaro	14871
Puruándiro	5910
Zacapu	74761

9 Metodología

En la Figura 10 se presenta el esquema metodológico adoptado para la determinación del riesgo ante sequías en la cuenca del río Angulo. A partir de la información recopilada y gestionada se calculan los índices de peligro y vulnerabilidad, a partir de los cuales se calcula el índice de riesgo.

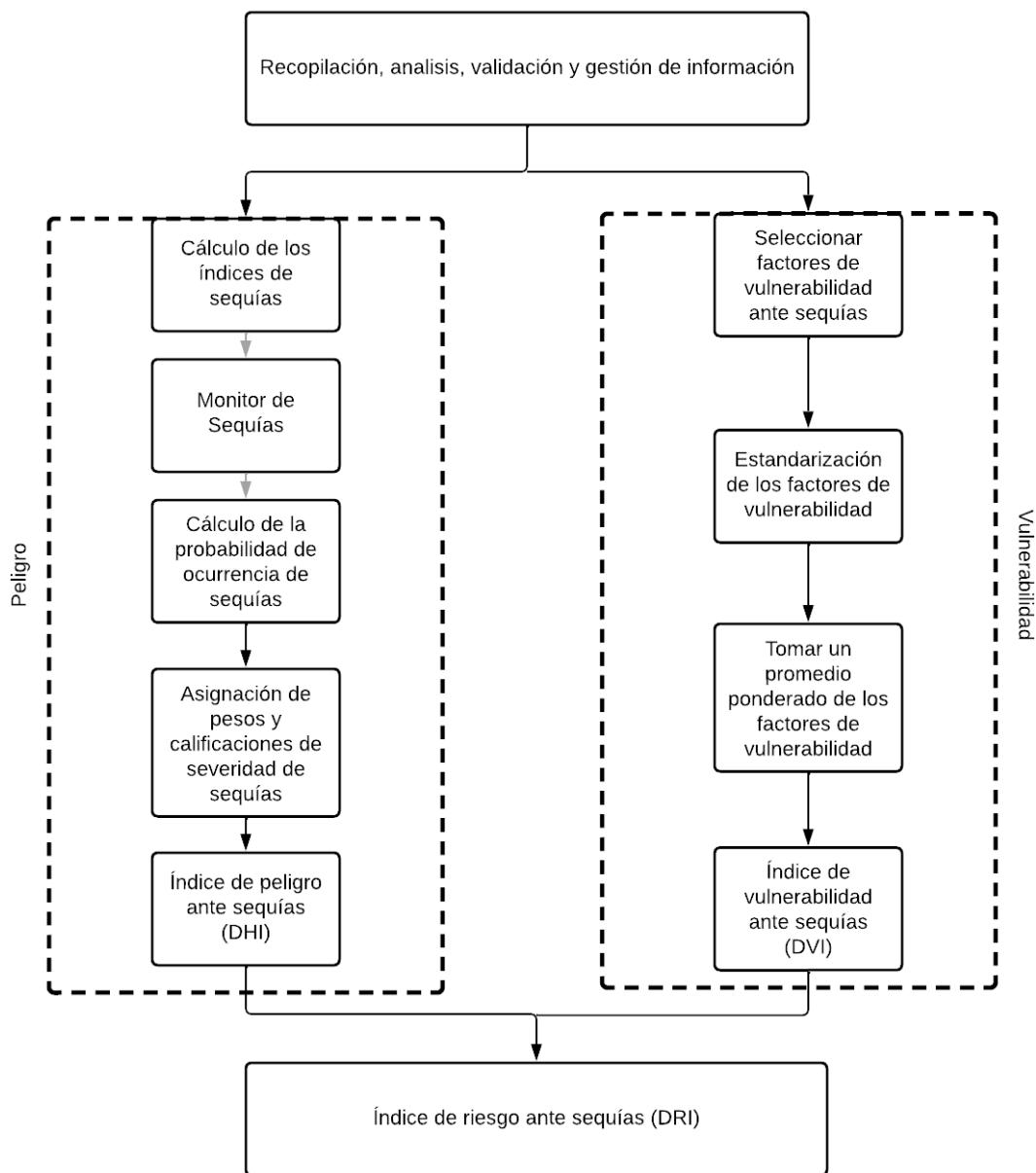


Figura 10. Esquema metodológico para determinar el riesgo ante sequías.

9.1 Recopilación y validación de información

Para esta investigación se necesitan diferentes tipos de datos, tanto para el cálculo de los índices de sequía como para los factores de vulnerabilidad. La información que se requiere para los índices de sequía es meteorológica y satelital. En lo que respecta a la información de vulnerabilidad, se emplean diversos datos que se explicarán en el apartado correspondiente a los índices de sequía.

Los datos meteorológicos proporcionan información sobre la precipitación y la temperatura. En el proceso de validación, es crucial centrarse en la información de precipitación, asegurándose de que sea representativa y precisa del área de interés. La fiabilidad de estos datos es fundamental, y para ello, las series utilizadas deben cumplir con dos propiedades esenciales: homogeneidad e independencia. Es decir, los datos deben ser coherentes en su composición a lo largo del tiempo (homogéneos) y no deben estar influenciados por eventos previos (independientes) (Cao & Yan, 2012).

Actualmente, no existe una metodología conjunta que enmarque el proceso a seguir para la evaluación y validación de series temporales de precipitación (Sánchez-Quispe et al., 2021). La literatura actual destaca las siguientes pruebas de homogeneidad como las más destacadas: la prueba de secuencias, test de Helmert, prueba de la t de Student, test de Cramer, Curva Masa Doble (prueba de consistencia) y Wald-Wolfowitz. Mientras que para la independencia se utilizaron los límites de Anderson.

El primer paso para la selección de las estaciones meteorológicas consiste en una exploración de las estaciones en el área de estudio. Posteriormente, se hizo una calificación de las estaciones para seleccionar las mejores basándose en cinco criterios (Sánchez-Quispe et al., 2021):

- 1) Número de años en servicio.
- 2) Porcentaje de datos faltantes.
- 3) Distancia de la estación al centroide de la cuenca en estudio.
- 4) Actualización de los datos.
- 5) Localización geográfica de las estaciones (generalmente se busca que las estaciones cubran toda el área de estudio).

Con las estaciones seleccionadas se obtuvieron y generan las series de análisis. La información se descarga de forma diaria de la base de datos del SMN. A continuación, se explican las pruebas que se realizaron:

9.1.1 Test de secuencias

Consiste en evaluar el signo de las diferencias entre cada dato y la media muestral, y comparar el número de cambios permitidos (u) en función del tamaño muestral (n). Hay una serie de cambios permitidos dependiendo del tamaño de la muestra. Si el número de cambios registrados está entre los valores establecidos en los rangos presentado en la Tabla 2, entonces la serie se dice que es homogénea (Mather, 1975), sino cumple con esto se considera no homogénea.

Para realizar la prueba, se necesita tener la media de la serie continua de datos. Continuaremos comparando en orden cronológico la serie con el valor de la media, si el valor es menor que la media se colocara una L (lower, bajo), en cambio sí es mayor se coloca una M (mayor).

Tabla 2. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 42
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

9.1.2 Prueba de Helmert

Este procedimiento, sencillo en su esencia, requiere ordenar la serie cronológicamente y determinar el signo de las desviaciones de cada dato respecto a la media. Cuando una desviación con un signo específico es seguida por otra del mismo signo, se identifica como una secuencia "S"; de lo contrario, se considera un cambio "C". Al finalizar el análisis de la serie completa, se contabilizan los cambios y las secuencias, procediendo finalmente a aplicar la ecuación[1]. Si se cumple la desigualdad, la estación puede considerarse homogénea (Doorembos, 1976).

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1} \quad [1]$$

9.1.3 Curva masa doble

El método de la curva masa doble (Martínez et al., 2006) verifica si los datos de una estación presentan alteraciones que generen valores incorrectos. Este enfoque se basa en la idea de que, dentro de una zona con condiciones meteorológicas uniformes, los niveles de precipitación registrados en diversos puntos de la región muestran una relación proporcional que puede representarse visualmente. Para ello, es necesario determinar la estación y calcular la cantidad de lluvia acumulada en un año. Además, para hacer comparaciones precisas, se requiere al menos una estación de referencia con datos anuales que sean consistentes con los de la estación a estudiar.

Para cada estación, en cada año, a partir del primer año con registro, se obtiene el valor acumulado de la estación y el valor de la estación de referencia. Posteriormente se grafican los valores de precipitación anual de la estación. Cuando los registros permanecen consistentes, los puntos se ajustan a una línea con una pendiente única y uniforme, lo que indica ausencia de errores. En cambio, si la pendiente presenta variaciones, esto sugiere que una parte de la serie contiene datos incorrectos (Sánchez-Quispe et al., 2021).

9.1.4 Prueba estadística de la t de Student

Cuando la pérdida de homogeneidad en la serie es provocada por un cambio abrupto en la media, la prueba estadística de la t de Student es útil. Lo primero que se recomienda es hacer un gráfico de la precipitación anual, en el que se pueda observar el comportamiento de la serie con respecto al tiempo. De esta manera, podemos delimitar los períodos de tiempo en los que hay un salto (cambio en la tendencia de la media de la serie) y que, hace que la media de las precipitaciones aumente o disminuya; por lo tanto, tendremos dos períodos n_1 y n_2 , cada uno con el cálculo del valor de la media X_1 y X_2 (Campos Aranda, 1998).

La prueba estadística de la t de Student se define como se muestra en la ecuación [2] (WMO, 1966):

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}} \quad [2]$$

Dónde:

\bar{x}_1, s_1 : se refieren a la media y la varianza correspondientes a la primera sección del registro, que tiene un tamaño de n_1 .

\bar{x}_2, s_2 : se refiere a la media y la varianza correspondiente a la segunda sección del registro, que tiene un tamaño n_2 .

El valor absoluto de t_d se contrasta con el valor de la distribución t de Student para dos colas, considerando $v=n_1+n_2-2$ grados de libertad y un nivel de significancia de $\alpha= 0.05$, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Grados de Libertad para la distribución t de Student (Campos Aranda, 1998).

Grados de libertad	Nivel de Significación		Grados de libertad	Nivel de Significación	
	5%*	5%**		5%*	5%**
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.920	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.080
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.860	2.306	25	1.708	2.060
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.226	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.160	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2.00
16	1.746	2.120	120	1.658	1.980
17	1.740	2.110	∞	1.645	1.960

* Prueba de una cola **Prueba de dos colas

9.1.5 Prueba estadística de Cramer

En ocasiones, resulta más práctico contrastar la media de toda la serie con la media de una sección específica de la misma para evaluar la homogeneidad. En estos casos, la prueba estadística de Cramer puede ser

muy valiosa, especialmente cuando los períodos de la serie son diferentes. Sin embargo, si los valores de n_1 y n_2 son muy parecidos, la prueba de la t de Student pierde su validez (Campos Aranda, 1998).

La prueba requiere los valores medios aritméticos \bar{x} , ecuación [3], y la desviación estándar S , ecuación [4], del logaritmo total del n número de valores:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad [3]$$

$$S = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad [4]$$

Por otro lado, \bar{x}_k es la media del periodo n' , el cual es un subperiodo de n , este es el que tiene la mayor diferencia con respecto a la media de la serie completa; de modo que el valor de t_k se calcula según se muestra de la ecuación [5] a la ecuación [7] (WMO, 1966) :

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=k-1}^{i=k+n} x_i}{n'} \quad [5]$$

$$\tau_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{x})}{S} \quad [6]$$

$$t_k = \left[\frac{n'(n-2)}{n-n'[1+(\tau_k)^2]} \right]^{1/2} \times (\tau_k) \quad [7]$$

Al igual que con la prueba de Secuencias y la prueba de Helmert, se recomienda que la prueba de la t de Student y la prueba de Cramer se realicen al mismo tiempo, porque ambas son complementarias, están basadas en la comprensión del gráfico de precipitación anual y, el valor de significancia con el que se compara es el mismo (Sánchez-Quispe et al., 2021).

9.1.6 Prueba de Wald-Wolfowitz

Esta prueba tiene como objetivo identificar las diferencias entre dos series de precipitación anual de tamaño N_1 y N_2 , que provienen de dos estaciones meteorológicas diferentes. Para llevar a cabo este análisis, primero se debe generar una única serie mezclando los datos provenientes de las dos estaciones ordenándolos de manera ascendente. Posteriormente, se calcula el número de secuencias o intervalos en la serie ordenada. Una secuencia se define como cualquier conjunto de valores consecutivos que pertenecen a la misma serie, donde X representa la estación principal y Y la estación auxiliar (Campos Aranda, 1998).

De acuerdo con Siegel (2015), el estadístico de la prueba, z, se calcula como se presenta de la ecuación [8] a la ecuación [10]:

$$z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R^2} \quad [8]$$

$$\mu_R = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n} + 1 \quad [9]$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n - 1}} \quad [10]$$

9.1.7 Límites de Anderson

Para determinar la independencia de la serie se utilizan los Límites de Anderson con un 95 % de confiabilidad (Anderson, 1942). Se dice que una serie es independiente cuando los valores de cada uno de los datos no se ven afectados por los siguientes datos de la misma serie.

Para calcular el correlograma, se debe considerar que a partir de la serie original (X) se genera una serie modificada (Y) cuya configuración está determinada por el desfase (k) que se aplique; de esta forma, para un mismo desfase k, se tiene una serie X y una serie Y (Salas et al., 1980).

Entonces, según el número de desfases, representa la cantidad de valores presentes en el correlograma (ρ), donde σ_x y σ_y corresponden a las desviaciones estándar de las series X y Y, respectivamente y, n indica el

número total de datos de la serie, como se muestra en la ecuación [11] y ecuación [12]:

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [11]$$

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad [12]$$

Para determinar los límites de probabilidad de series independientes, se utilizan los límites de Anderson para un 95 % de nivel de confianza, como se indica en la ecuación [13]:

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad [13]$$

Para las estaciones meteorológicas, si menos del 10 % de los valores de autocorrelación calculados superan los límites, se dice que la serie de datos es independiente. Caso contrario sucede con las estaciones hidrométricas, ya que se requiere que al menos el 90 % de los valores se encuentren por fuera de los límites de Anderson para considerar que la serie es persistente.

9.2 Peligro

9.2.1 Índices de sequía

Uno de los aspectos clave para manejar el riesgo de sequía es el monitoreo constante y la alerta temprana de este fenómeno. En México, el SMN se encarga de estas tareas a través del Monitor de Sequías en México (MSM) (Ortega-Gaucin et al., 2019). La metodología del MSM se basa en la recopilación y análisis de varios índices e indicadores, como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y la Anomalía de Lluvia en porcentaje de lo Normal (PPN), que ayudan a medir los niveles de déficit o exceso de precipitación. Además, se utilizan el Índice de Salud de la Vegetación (VHI) y el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI), que evalúan el

estrés en las plantas utilizando datos de radiancia obtenidos a partir de imágenes satelitales (SMN, 2023).

Además de los índices empleados en el MSM, en la presente investigación también se utilizaron el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) como lo emplean Lobato Sánchez et al. (2019). La metodología de estos índices se explica en los siguientes párrafos.

9.2.1.1 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), desarrollado por McKee et al (1993), se determina calculando la diferencia entre la precipitación observada y el promedio de un periodo específico, dividiendo este valor por la desviación estándar correspondiente.

Para calcular el SPI, los datos de precipitación del período estadístico se ajustan a la función de distribución de probabilidad gamma, $g(x)$, como se muestra en la ecuación [14]:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (x > 0) \quad [14]$$

Donde:

α es el parámetro de forma, que se estima utilizando el método de máxima verosimilitud.

β es el parámetro de escala.

x es la precipitación en mm.

$\Gamma(\alpha)$ son característica de la función gamma.

Las ecuaciones para el cálculo de α y β se explican en las ecuaciones [15] y [16], respectivamente:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad [15]$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{4A} \quad [16]$$

Donde:

A es un componente adimensional usado para el cálculo de α y β , que se explica en la ecuación [17].

\bar{x} es el promedio de precipitación (mm) para un mes dado durante el período estadístico.

$$A = \left[\ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \right] \quad [17]$$

Donde:

n es el número de datos.

Los parámetros calculados permiten que la distribución de la precipitación se represente de manera efectiva mediante una función de probabilidad acumulada, $G(x)$, como se muestra en la ecuación [18]:

$$G(x) = \int_0^x \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad [18]$$

Cuando los registros mensuales contienen valores nulos, el cálculo de A se vuelve inviable. En consecuencia, se recurre a la Función Gamma Mixta, desarrollada por Thom (1966) y Wu et al. (2005), como se muestra en la ecuación [19]:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad [19]$$

Donde:

q es la posibilidad de que ocurra un registro nulo dentro de la serie.

$H(x)$ es la probabilidad de que el registro no supere un valor específico dentro de la serie.

Luego, $H(x)$ se convierte a la distribución normal estándar para calcular los valores del SPI (Mckee et al., 1993).

Mckee et al. (1993) emplearon un sistema de clasificación para establecer los valores del SPI, como se detalla en la Tabla 4. Estas categorías están asociadas al fenómeno de sequía meteorológica, lo que significa que representan eventos secos temporales, pero no implican una condición de aridez (Colotti et al., 2013).

Tabla 4. Clasificación del SPI (Mckee et al., 1993).

SPI	Categoría
≥ 2.0	Extremadamente húmedo
$1.5 < SPI < 1.99$	Muy húmedo
$1.0 < SPI < 1.49$	Moderadamente húmedo
$-0.99 < SPI < 0.99$	Normal o aproximadamente normal
$-1.0 < SPI < -1.49$	Moderadamente seco
$-1.5 < SPI < -1.99$	Severamente seco
≤ -2	Extremadamente seco

9.2.1.2 Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)

Se utiliza el índice de precipitación-evapotranspiración (SPEI por sus siglas en inglés) (Vicente-Serrano et al., 2010), aplicando el mismo cálculo empleado para la deducción del SPI. Este índice, basado en datos de precipitación, temperatura y latitud del lugar, calcula un balance hídrico mensual que compara la precipitación con la evapotranspiración potencial (ETP), la cual se determina a través de la fórmula de Thornthwaite (1948), presente en la ecuación [20]:

$$ETP = 16K \left(\frac{10t_i}{I} \right)^m \quad [20]$$

Donde:

K es un coeficiente de corrección.

T_i es la temperatura media mensual.

I, m son parámetros calculados durante la aplicación de la fórmula.

La serie del balance hídrico se adapta con la función de distribución de probabilidad de tres parámetros log-logística, que se muestra en la ecuación [21]:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right) \right]^{-2} \quad [21]$$

Donde:

α, β y γ son los parámetros de escala, forma y origen.

9.2.1.3 Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI)

El NDVI es una medida indirecta de la producción primaria que se fundamenta en su vínculo con la radiación fotosintéticamente activa (Rojas et al., 2011). Este índice ha probado ser muy efectivo para examinar las características de la vegetación y actúa como un indicador cuantitativo del rendimiento de los ecosistemas (Arboit & Maglione, 2018). Se calcula utilizando el cociente normalizado entre distintas bandas espectrales, destacando el contraste entre las bandas visibles (0.6 a 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 μm), lo que permite distinguir la vegetación de otras superficies (Chuvieco, 2000).

El NDVI tiene un rango de valores que va de -1 a +1. Cuando los valores son altos, esto indica que hay una gran actividad fotosintética en la vegetación, lo que está muy relacionado con la evapotranspiración. Por otro lado, los valores bajos sugieren que la cubierta vegetal es escasa o incluso

inexistente, y que la actividad fotosintética es bastante baja (Tucker & Sellers, 1986). Estos valores se obtienen utilizando las bandas 5 y 4, tal como se indica en la ecuación [22]:

$$NDVI = (NIR - R) \div (NIR + R) \quad [22]$$

Dónde:

NIR → Infrarrojo Cercano

R → Rojo

Los valores negativos del NDVI se relacionan con áreas que contienen agua, estructuras artificiales, rocas, nubes o nieve. Por otro lado, las plantas siempre muestran valores positivos, que varían entre 0.2 y 1 (Cherlinka, 2020). La clasificación del NDVI se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación del NDVI (Cherlinka, 2020).

NDVI	Vegetación
-1 a 0	Planta muerta u objeto inanimado
0 a 0.33	Planta enferma
0.33 a 0.66	Planta moderadamente saludable
0.66 a 1	Planta muy saludable

9.2.1.4 Índice Satelital de Salud Vegetal (VHI)

El VHI es un índice que fusiona el Índice de Condición de la Vegetación (VCI) y el Índice de Condición de la Temperatura (TCI).

Según Kogan (1995b), el VCI se fundamenta en el NDVI. Este índice coloca el NDVI dentro de un rango de valores máximos y mínimos de la serie histórica de datos satelitales, y su cálculo se detalla en la ecuación [23]:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{mín}}{NDVI_{máx} - NDVI_{mín}} \times 100 \quad [23]$$

Donde:

$NDVI_{máx}$ y $NDVI_{mín}$ representa el NDVI máximo y mínimo de cada píxel calculado para cada mes.

$NDVI_i$ representa el índice del mes en curso.

Los valores del VCI se miden en porcentaje y oscila entre 1 y 100. Las imágenes resultantes del VCI se clasifican de acuerdo con la clasificación de severidad de sequía propuesta por Kogan, (1995a) (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de VCI (Kogan, 1995a).

Valor	Categoría	Color
100 – 90 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
90 – 80 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
80 – 70 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
70 – 60 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
60 – 50 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
50 – 40 %	Sin Sequía	Verde Oscuro
40 – 30 %	Ligeramente Seco	Amarillo Oscuro
30 – 20 %	Moderadamente Seco	Amarillo Oscuro
20 – 10 %	Severamente Seco	Naranja Oscuro
10 – 0 %	Extremadamente Seco	Rojo Oscuro

El VCI fue creado con la intención de diferenciar entre los factores climáticos y ecológicos que afectan el NDVI. Este índice no solo muestra la variabilidad espacial y temporal de la vegetación, sino que también ayuda a evaluar cómo el clima impacta en ella (Kogan, 1995b; Unganai & Kogan, 1998).

Por otro lado, el Índice de Condición de la Temperatura (TCI) utiliza un método de cálculo similar al del VCI, pero se basa en la temperatura que se obtiene de la banda infrarroja del sensor AVHRR (banda 4). A lo largo del ciclo de cultivo, las temperaturas elevadas suelen señalar condiciones adversas o sequía, mientras que las temperaturas más bajas generalmente

indican un entorno más favorable (Kogan, 1995a). Por lo tanto, la fórmula del índice se presenta en la ecuación [24]:

$$TCI_i = \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} \quad [24]$$

Donde:

TCI_i es el índice de Condición de la Temperatura para la década i .

T_i es la temperatura de la década i .

T_{\max} es el valor máximo absoluto de temperatura registrado en la serie histórica.

T_{\min} es el valor mínimo absoluto de temperatura registrado en la serie histórica.

Finalmente, el VHI se obtiene combinando ambos índices, cuya expresión matemática se expresa en la ecuación [25]:

$$VHI_i = a \times VCI_i + (1 - a) \times TCI_i \quad [25]$$

Donde:

El parámetro a tiene un peso relativo que cambia de acuerdo con el cultivo que se estudie. En condiciones próximas a lo normal, la vegetación muestra mayor sensibilidad a la humedad durante la etapa de formación de hojas y a la temperatura en el período de floración (Rojas, 2016). No obstante, para el caso del ASIS (Índice de Intensidad de la Sequía) el valor del parámetro a se fija en 0.5 (FAO, 2024)

9.2.2 Monitor de sequía

Históricamente, las sequías han sido monitoreadas y clasificadas desde una estructura basada en observaciones puntuales de las estaciones climatológicas (*in-situ*) (Mishra & Singh, 2010b; A. Zhang & Jia, 2013;

AghaKouchak et al., 2015; Jiao et al., 2019;). No obstante, en regiones con información limitada, los índices de sequía provenientes de estaciones no son suficientes para caracterizar las condiciones de sequía. En situaciones como estas, la percepción remota puede ser una herramienta muy útil, ya que proporcionan observaciones continuas y consistentes de variables relevantes relacionadas con el estado del ecosistema y el ciclo hidrológico (Rhee et al., 2010; Wang et al., 2012; J. Wu et al., 2013; Lu et al., 2016; Rhee & Im, 2017).

A partir de los índices obtenidos, se elabora el monitor de sequía mediante el promedio de los mapas, empleando la herramienta de álgebra de mapas dentro de un sistema de información geográfica. Los datos son estandarizados con referencia a la tabla de clasificación del SPI, mostrada en la Tabla 4.

9.2.3 Probabilidad de ocurrencia

En términos generales, el peligro representa la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, con valores que fluctúan entre 0 y 1. Este se calcula como el producto de la magnitud del evento y la frecuencia con la que ocurre, como en el caso de un evento de sequía (Dabanli, 2018).

9.2.4 Asignación de pesos y clasificación de severidad

Utilizando un sistema de ponderación en una función de distribución acumulativa, se asignan puntuaciones de peso (W) y calificación (R) en función de probabilidad acumulada normal para la evaluación del peligro de sequía asociado con el peligro y las probabilidades de ocurrencia. Las puntuaciones de peso se determinan a partir de los intervalos de los índices de sequías, de modo que el peso es igual a 1, 2, 3 y 4 para sequía normal (ND), moderada (MD), severa (SD) y extrema (ED), respectivamente. Por otra parte, debido a que los índices mayores a 0 representan condiciones de humedad se les asigna un valor de 0. De manera similar, los puntuajes de calificación se asignan del 1 al 4 en orden creciente al dividir el intervalo de probabilidades acumulativas en cada rango de sequía.

Las puntuaciones de peso y clasificación se asignan en función de los intervalos, que se ilustran en la Figura 11. La multiplicación de las puntuaciones de peso y calificación genera una puntuación de riesgo de sequía (DHS, por sus siglas en inglés). El DHS agregado se obtiene mediante la ecuación [26].

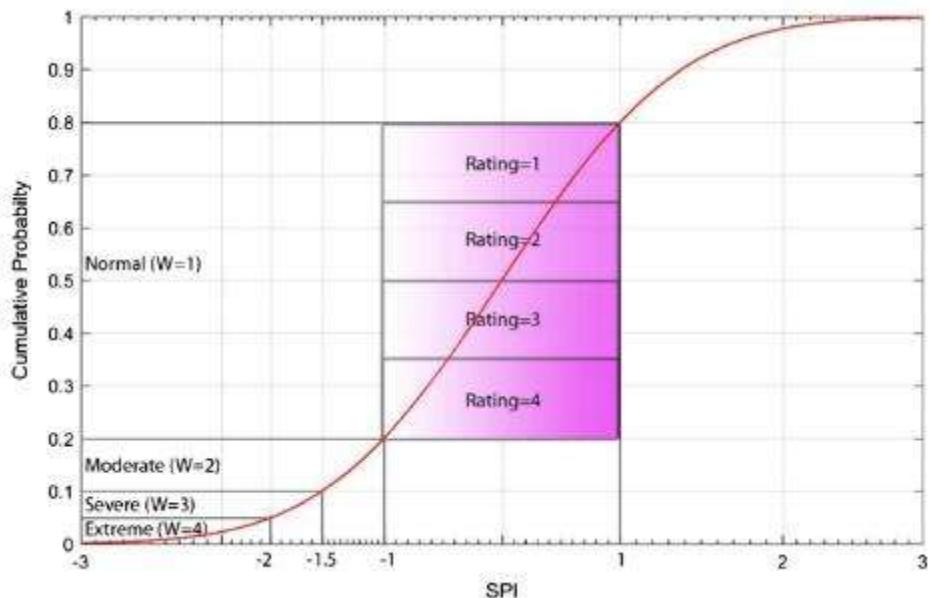


Figura 11. Puntuaciones de peso y clasificación basadas en la distribución de probabilidad acumulada normal de SPI (Dabani, 2018).

$$(DHS)_i = \sum_{i=1}^N W_{ix} R_i \quad [26]$$

Donde:

N se refiere al número de los valores de los índices para el intervalo de tiempo seleccionado.

9.2.5 Índice de peligro ante sequías

Para obtener el Índice de peligro ante sequías (DHI) por municipio, se obtiene el porcentaje de área A (%) y el DHS correspondiente a cada municipio con la fórmula que se presenta en la ecuación [27]:

$$(DHI)_i = \sum_{i=1}^n A(\%)_i \times (DHS)_i \quad [27]$$

Esta metodología se presenta como la opción más idónea en contraste con la metodología de los polígonos de Thiessen para calcular el Índice de Riesgo de Daños (DHI) en cada municipio. Mientras que los límites de los polígonos de Thiessen se establecen mediante líneas definidas, en este enfoque los límites de transición en la región de riesgo se mantienen uniformes. De este modo, se logra generar puntuaciones de peligro más realistas a nivel municipal.

9.3 Vulnerabilidad

9.3.1 Selección de factores

Los insumos utilizados para los cálculos de vulnerabilidad son los propuestos y usados por la CONAGUA (2022) en el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE); son 24 indicadores, divididos entre Vulnerabilidad económica, social y ambiental, así como también se deben dividir en tres componentes: grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (Tabla 7).

Tabla 7. Indicadores propuestos por CONAGUA (2022), agrupados en los tipos y componentes de la vulnerabilidad ante sequía.

Tipo de Vulnerabilidad		Componente de la Vulnerabilidad		
		Grado de exposición (GE)	Sensibilidad (S)	Capacidad de Adaptación (CA)
Indicadores				
Global	Económica	- Densidad de población (hab/km ²) - Población económicamente	- Valor de la producción agrícola de riego y de temporal (miles \$)	- Superficie rehabilitada al riego (ha) - Superficie agrícola

	activa desocupada (%)	-Valor de producción del ganado en pie (miles \$)	tecnificada (ha) - Longitud de caminos rurales (km)
Social	- Población en condiciones de pobreza (%) - Población sin derechohabiencia a servicios de salud (%) - Población analfabeta (%)	-Viviendas sin agua entubada (%) - Viviendas sin drenaje ni excusado (%) - Viviendas sin energía eléctrica (%) - Viviendas con piso de tierra (%)	- Ingreso per cápita anual (dólares) - Beneficiarios del Programa Oportunidades (%) - Beneficiarios del programa Liconsa (%) - Años promedio de escolaridad (adim.)
Ambiental	- Grado de explotación de las cuencas (adim.) -Grado de explotación de acuíferos (adim)	-Deforestación (% del área critica forestal) - Superficie afectada por incendios forestales (ha)	- Superficie reforestada (ha) - Áreas naturales protegidas (%)

Sin embargo, debido a la escala de la información y a la falta de la misma, se decidió agregar algunos factores, con base en el trabajo realizado por Ortega-Gaucin et al, (2018), como la superficie erosionada y la cobertura vegetal de la zona.

De acuerdo con la ecuación [28], el grado de exposición y la sensibilidad aumentan de acuerdo con la vulnerabilidad. Por el contrario, si la capacidad de adaptación aumenta, la vulnerabilidad disminuirá (Vargas & Paneque, 2021).

$$Vulnerabilidad = Exposición + Sensibilidad - Cap. de adaptación \quad [28]$$

Donde:

El grado de exposición se refiere a los elementos que podrían ser impactados por un evento natural peligroso.

La sensibilidad abarca las características de dichos elementos que los hacen más vulnerables a sufrir daños frente a un peligro natural.

La capacidad de adaptación engloba las cualidades y habilidades que permiten a una sociedad responder de manera efectiva tanto a corto como a largo plazo.

9.3.2 Estandarización de factores

Dado que los indicadores tienen diferentes unidades, es fundamental normalizarlos para que sus valores se encuentren entre 0 y 1. Este proceso implica entender cómo se relaciona cada indicador con la vulnerabilidad ante las sequías. Hay dos tipos de relaciones que podemos identificar: una en la que la vulnerabilidad aumenta, lo que establece una relación directa, y otra en la que disminuye, lo que sugiere una relación inversa.

Para la normalizar los indicadores con una relación funcional directa, se usa la ecuación [29]:

$$X_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad [29]$$

Para los indicadores con una relación funcional inversa, se aplica la fórmula correspondiente, definida en la ecuación [30]:

$$X_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad [30]$$

Donde, en ambas ecuaciones:

X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i .

x_{min} es el valor mínimo del conjunto de datos.

x_{max} es el valor máximo del conjunto de datos.

Tras obtener los valores normalizados, se calculan los pesos empleando el método desarrollado por Iyengar y Sudarshan (1982) (ecuación [31])

$$P_i = \frac{1}{(\sigma_1) \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \right)} \quad [31]$$

Donde:

P_i es el peso del indicador normalizado i .

σ es la desviación estándar del conjunto de valores del indicador i .

n es el número de indicadores seleccionados.

9.3.3 Promedio ponderado de factores

Para calcular los índices de vulnerabilidad global, primero es necesario determinar los índices de vulnerabilidad económica, social y ambiental (IVE, IVS e IVA, respectivamente), siguiendo lo que se indica en la ecuación [32]:

$$IVE, IVS, IVA = \sum_{i=1}^n X_i P_i \quad [32]$$

Donde:

X_i es el valor normalizado del indicador i .

P_i es el peso del indicador normalizado i .

n es el número de indicadores correspondientes a cada tipo de vulnerabilidad.

9.3.4 Índice de vulnerabilidad ante sequías

Finalmente, el índice de vulnerabilidad global (IVG) se determina asignándole un peso P_i de 1/3 a cada uno de sus componentes, según lo estipula la ecuación [33]:

$$IVG = \frac{IVE}{3} + \frac{IVS}{3} + \frac{IVA}{3} \quad [33]$$

Para clasificar los índices que hemos obtenido, utilizamos la distribución probabilística beta (Iyengar & Sudarshan, 1982). Esta distribución es ideal porque tiende a ser sesgada y sus valores se encuentran dentro del rango de (0,1).

Para clasificar los índices de vulnerabilidad (IV) según su probabilidad de ocurrencia, primero convertimos los valores de probabilidad en porcentajes multiplicándolos por 100. Luego, organizamos estos porcentajes en cinco categorías que corresponden a percentiles de igual tamaño (20 %). Esto nos permite establecer cinco niveles de vulnerabilidad, tal como se detalla en la Tabla 8:

Tabla 8. Categorías para clasificar el grado de vulnerabilidad ante la sequía (Ortega-Gaucin et al., 2018).

Grado de vulnerabilidad	Valor del percentil
Muy baja	$0 < IV_i \leq 20$
Baja	$20 < IV_i \leq 40$
Moderada	$40 < IV_i \leq 60$
Alta	$60 < IV_i \leq 80$
Muy Alta	$80 < IV_i \leq 100$

9.4 Riesgo

La fórmula empleada para estudiar el riesgo es la que utiliza la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015) y el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2012), y ha sido utilizada con anterioridad en diversos trabajos (Peduzzi et al., 2002, 2009; Cardona et al., 2012; Carrão et al., 2016). Esta se define en la ecuación [34]:

[34]

$$Riesgo = Vulnerabilidad \times Peligro$$

Como se explicó en las secciones anteriores se utilizaron tres tipos diferentes de datos para abordar los tres componentes del riesgo.

10 Resultados y discusión

10.1 Estaciones meteorológicas.

En la Figura 12 se presenta la ubicación de las estaciones tanto principales como secundarias que se encuentran dentro y alrededor de 25 km de la cuenca del río Angulo. En la Tabla 9 se muestran sus datos principales obtenidos del SMN.

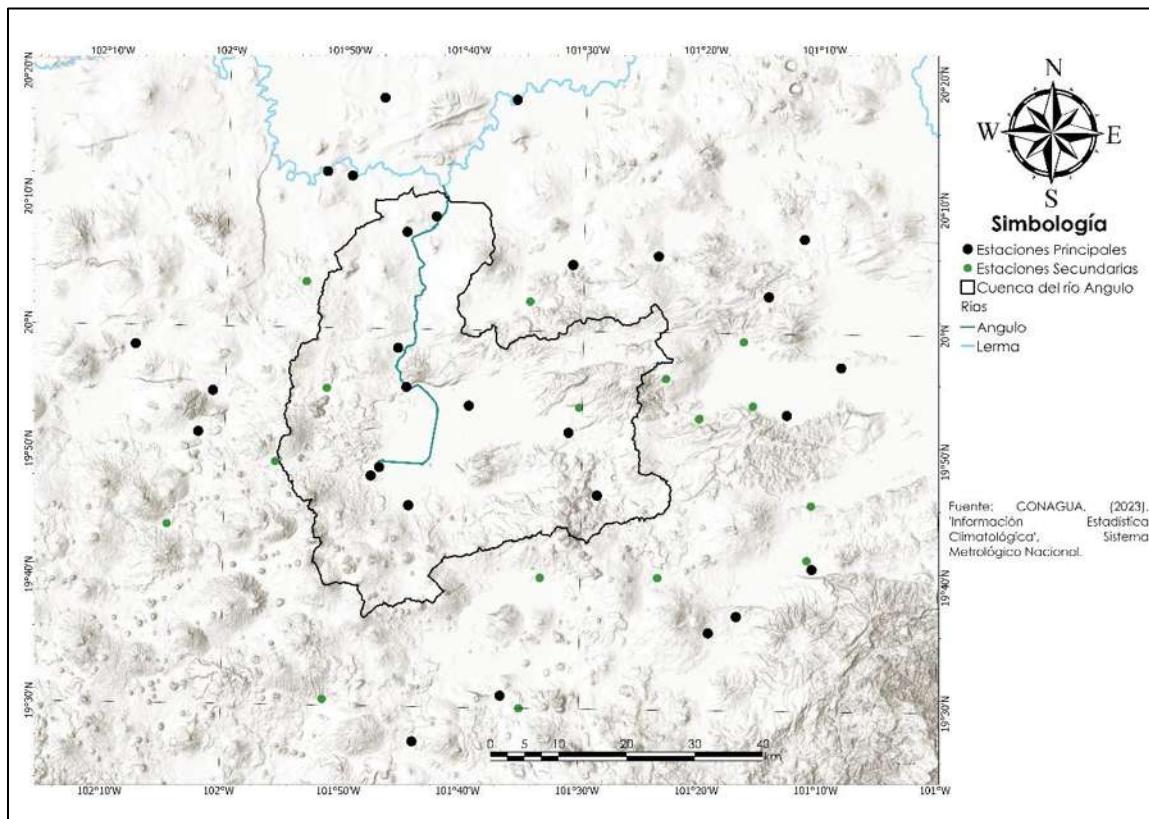


Figura 12. Ubicación de las estaciones meteorológicas (CONAGUA, 2023c).

Tabla 9. Listado de estaciones meteorológicas para la cuenca del río Angulo, obtenidas de la base de datos del SMN (CONAGUA, 2023c).

Código	Años en Servicio	Años Efectivos	% de Vacíos	Años	
				De	A
11010	56.8	53.5	5.73	1962	2018
11047	96	54.1	43.66	1922	2018
11151	38.8	36.2	6.87	1979	2018

11158	37.8	32.7	13.47	1981	2018
16005	56.4	52.2	7.53	1923	1980
16015	58.2	42.3	27.22	1949	2007
16022	66.8	60.6	9.24	1940	2006
16023	31.4	29.2	7.16	1969	2001
16024	83.3	77.8	6.51	1934	2017
16027	94.7	85.6	9.6	1923	2017
16050	67.5	66	2.22	1948	2015
16081	70.7	69.8	1.3	1947	2017
16084	70.8	57.2	19.2	1946	2017
16086	50.3	38.8	22.85	1967	2017
16087	49	42.7	12.93	1969	2017
16100	46.1	45.4	1.45	1947	1993
16103	38.3	36.2	5.65	1948	1986
16104	73.3	49.8	31.97	1942	2015
16117	70.6	59.1	16.29	1946	2017
16120	53.9	53.3	1.08	1953	2007
16137	66.9	57.7	13.82	1949	2015
16142	49.4	38.7	21.75	1968	2017
16146	70.3	60.7	13.64	1947	2017
16155	47.3	37.5	20.77	1969	2017
16159	45.6	43.4	4.75	1972	2017
16171	46.6	46.3	0.54	1923	1969
16188	29.3	29	0.85	1973	2003
16225	37	32.6	11.94	1981	2017
16253	35.8	24.9	30.47	1982	2017
16254	36	35.6	1.16	1982	2017

Mediante el software GESTAD se realizaron las pruebas de homogeneidad e independencia. De todas las estaciones que se encontraron se seleccionaron únicamente 22 (Tabla 10).

Tabla 10. Estaciones seleccionadas con los resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia.

ID	T-Student	Cramer	L. Anderson	Wald-wolfowitz
11010	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
11047	Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
11151	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
11158	Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16024	No Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16027	No Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16050	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16081	No Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16084	No Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16086	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16087	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16100	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16104	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16117	No Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16137	No Homogénea	No Homogénea	Independiente	Independiente
16142	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16146	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16155	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16159	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16225	Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16254	No Homogénea	Homogénea	Independiente	Independiente
16253	Homogénea	Homogénea	Sin datos	Independiente

Para poder determinar la zona de influencia de cada una de las estaciones, se construyeron polígonos de Thiessen, estos se presentan en la Figura 13.

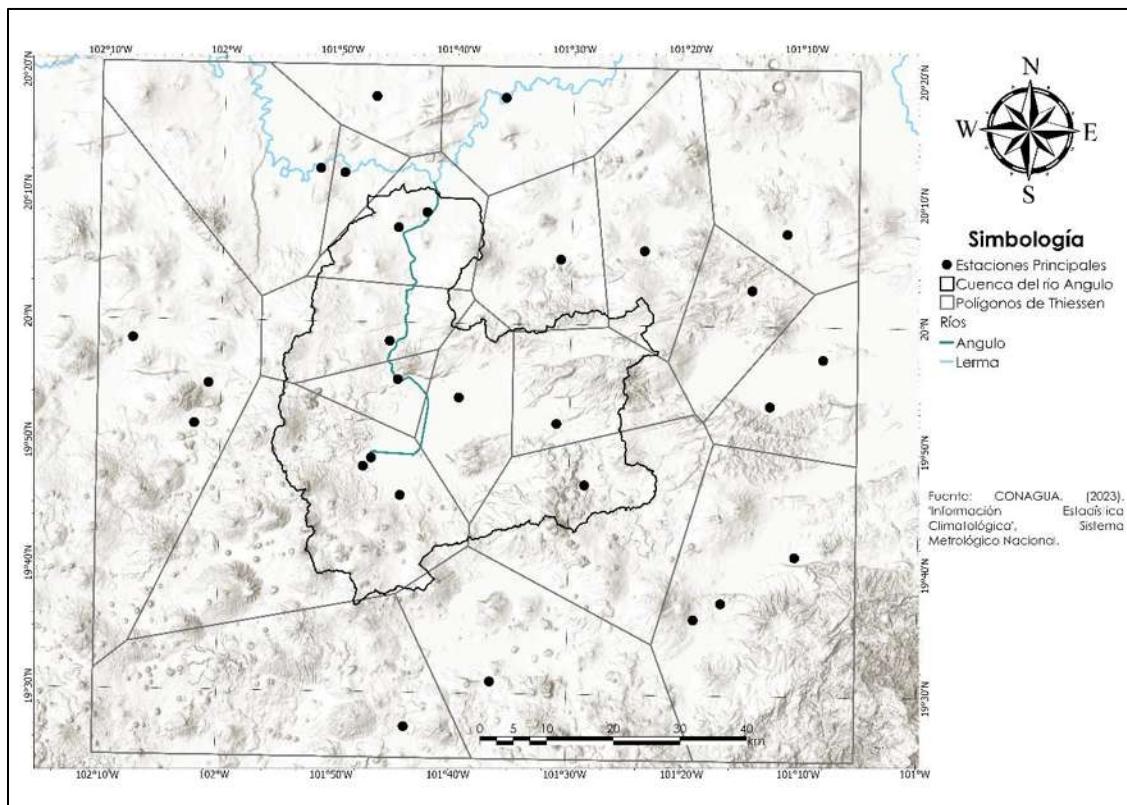


Figura 13. Polígonos de Thiessen en la cuenca del río Angulo.

10.2 Índices de sequía.

Con las estaciones principales seleccionadas se realizaron los cálculos para el SPI y el SPEI (índices *in-situ*), en la Figura 14 y Figura 15 se muestran los resultados a un mes de acumulación para la estación 16050.

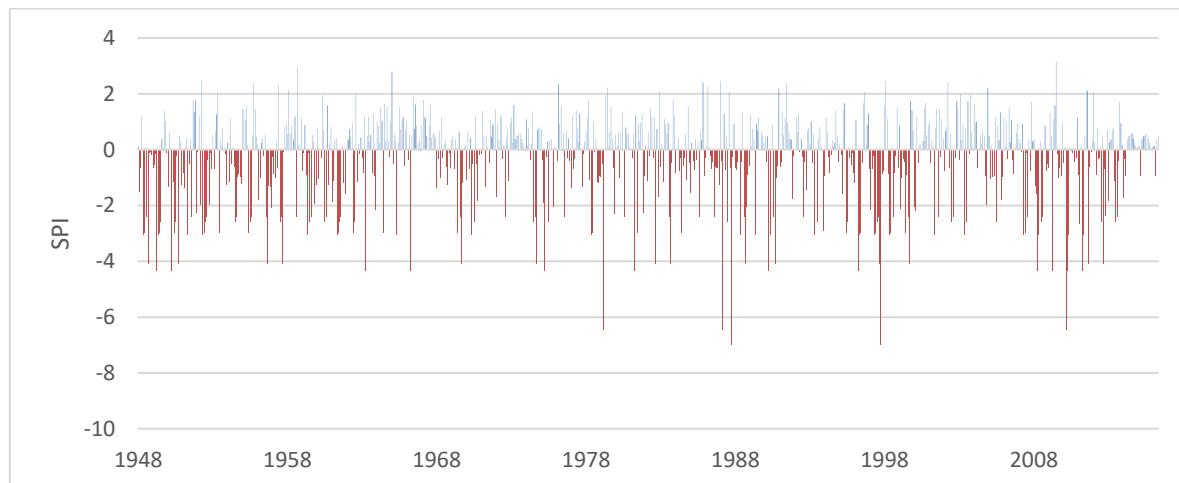


Figura 14. SPI a un mes para la estación 16050.

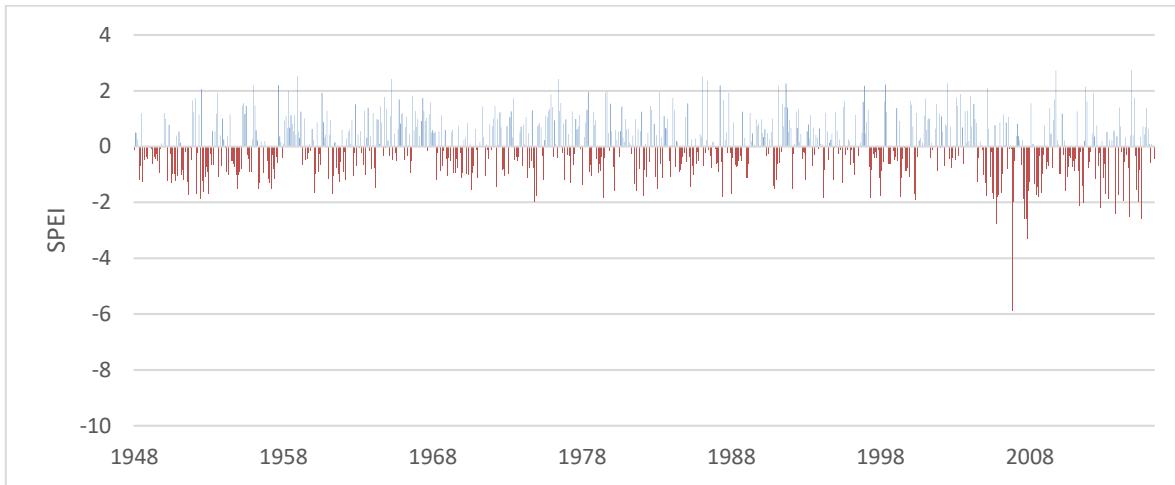


Figura 15. SPEI a un mes para la estación 16050.

En la Figura 14 y Figura 15 se puede apreciar como existe una disminución en las intensidades y magnitudes de las sequías en el SPEI con respecto al SPI, por otro lado, los periodos húmedos son muy similares entre ambos.

Del mismo modo se realizó un cálculo de los índices para un periodo acumulado de 3 meses, los resultados se exponen en las Figura 16 y Figura 17.

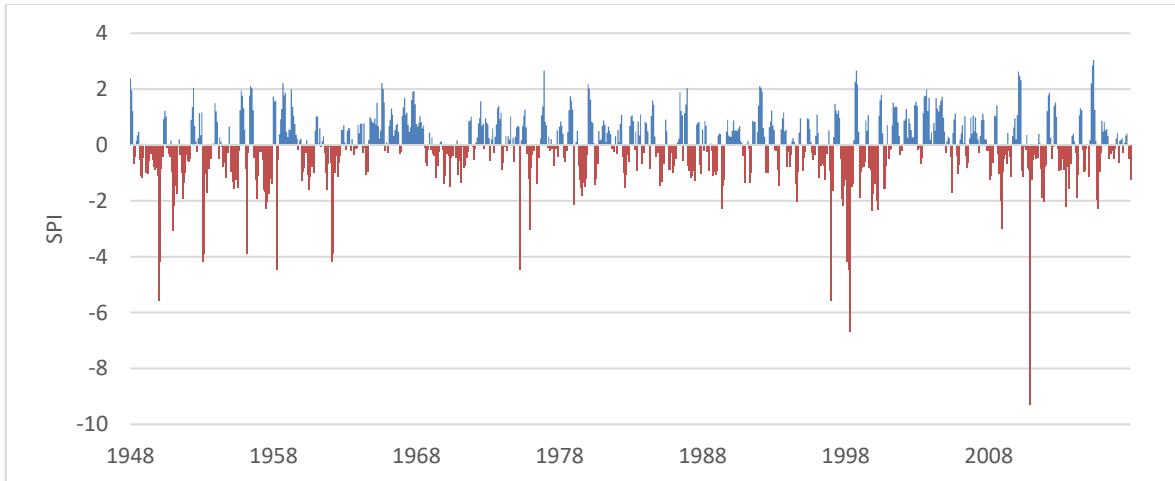


Figura 16. SPI a tres meses para la estación 16050.

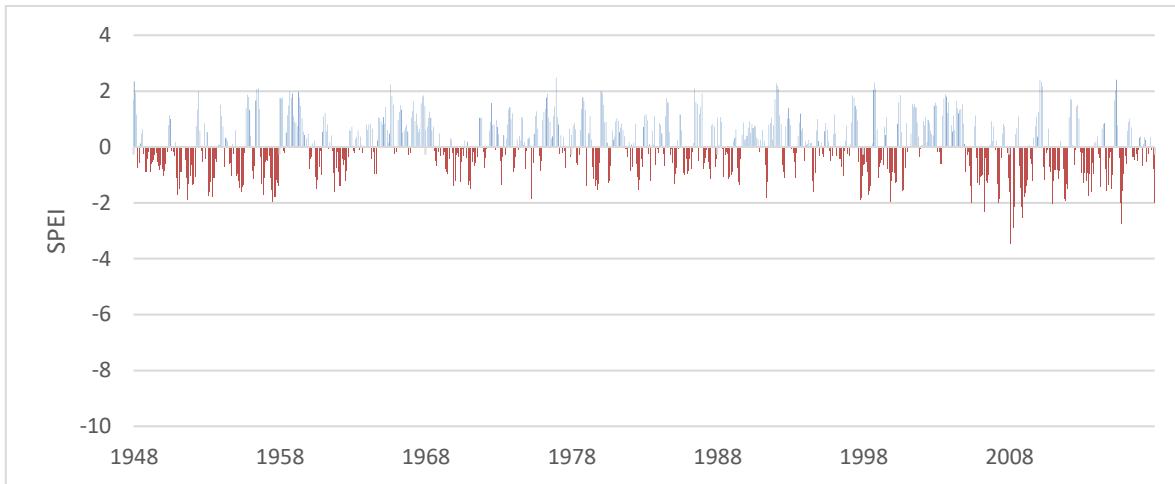


Figura 17. SPI a tres meses para la estación 16050.

Nuevamente, en la Figura 16 y Figura 17 se puede apreciar grandes diferencias entre el SPI y el SPEI, así como también se observa una reducción en la intensidad, magnitud y duración de las sequías al hacer un acumulado de 3 meses. Aunque en el caso del SPI se pueden apreciar un mes mucho más seco en el acumulado de 3 meses con respecto al acumulado de 1.

Con el fin de determinar las sequías meteorológicas ambos índices se mapearon, con un acumulado de un mes. Ambos índices se interpolaron usando el método IDW en un SIG, para el análisis se emplearon los valores predeterminados, tales como el número de vecinos (12) y el radio de búsqueda (variable), esto asegura una interpolación coherente. En las Figuras Figura 19 y Figura 20 se muestran los mapas para el año 2017, esto debido a que la mayoría de las estaciones tienen como último año con información el 2017. En la Figura 18 se muestra la simbología del SPI y SPEI que se utilizó en el mapeo.

Valor	Categoría	Color
> 2.0	Extremadamente húmedo	Verde
1.5 < x < 1.99	Muy húmedo	Verde
1.0 < x < 1.49	Moderadamente húmedo	Amarillo-verde
-0.99 < x < 0.99	Normal o aproximadamente normal	Amarillo
-1.0 < x < -1.49	Moderadamente seco	Amarillo-naranja
-1.5 < x < -1.99	Severamente seco	Naranja
< 2.0	Extremadamente seco	Naranja-rojo

Figura 18. Simbología del mapeo del SPI y SPEI (McKee et al., 1993)

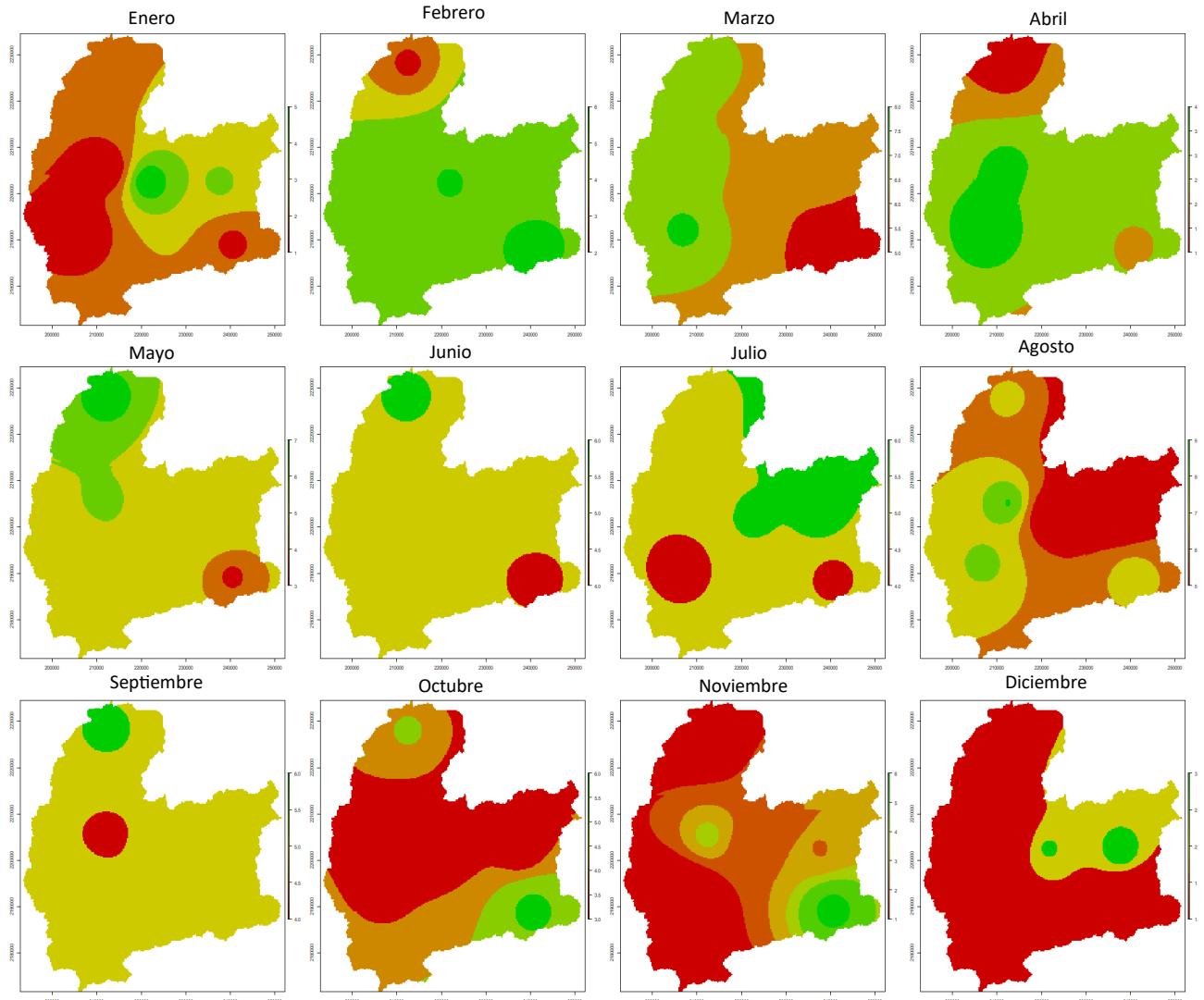


Figura 19. Mapas de extensión del SPI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.

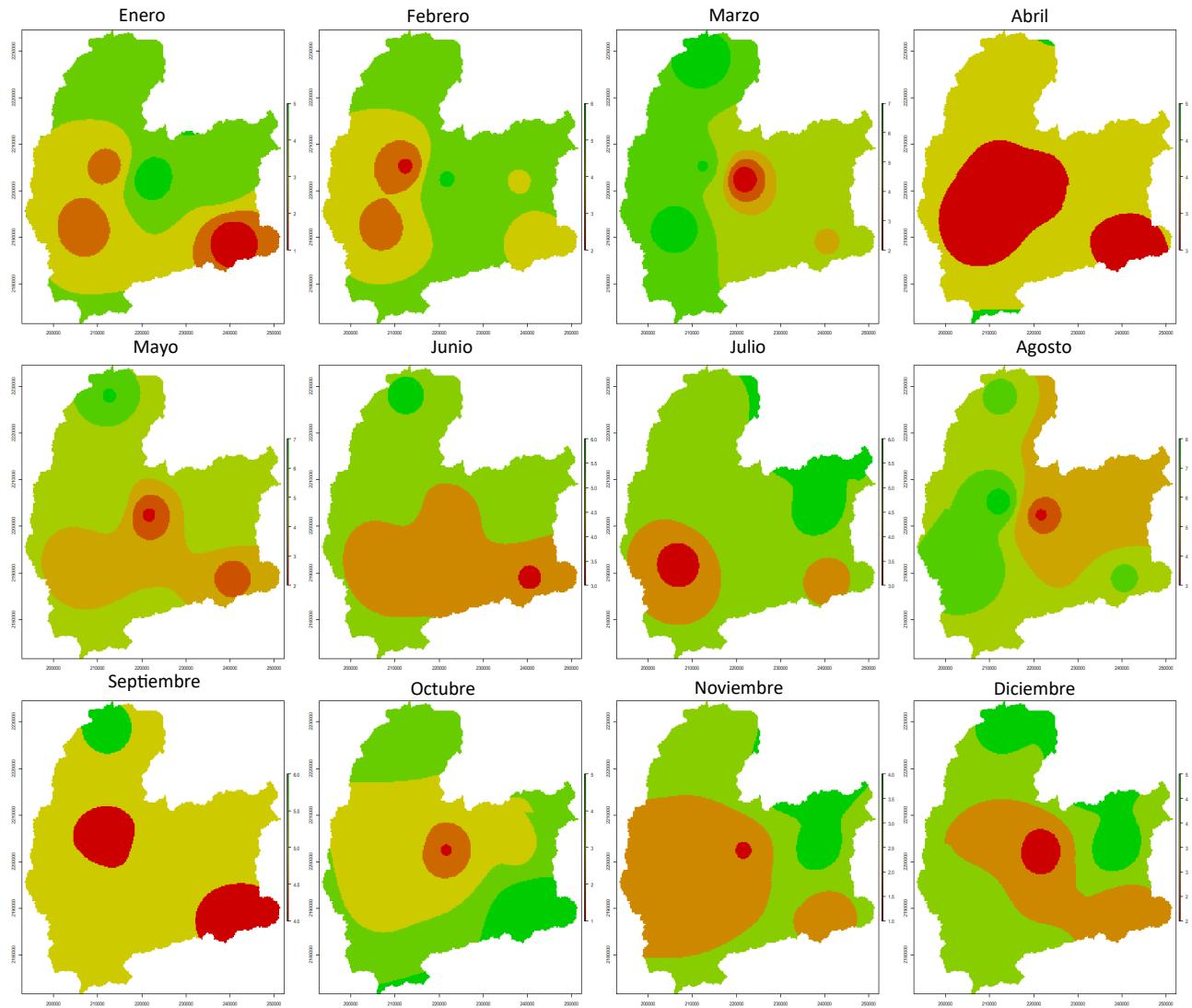


Figura 20. Mapas de extensión del SPEI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.

Los mapas mostrar diferencias, existiendo una reducción en la intensidad de las sequías en el SPEI con respecto al SPI, especialmente en el mes de noviembre. Sin embargo, se presenta una disminución de la humedad en el mes de febrero, pasando a una condición normal cercana a lo seco.

Tanto el SPI como el SPEI permiten comprender la situación meteorológica de la zona, sin embargo, esto no es suficiente para entender las sequías en la zona; por lo que es necesario hacer uso de índices satelitales.

Las imágenes satelitales se trabajaron mediante la plataforma GEE, se usaron las colecciones de imágenes MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation

Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061(Didan, 2021) y MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 (Wan, 2021). En la plataforma se trabajó con el código abierto “Google Earth Engine VHI Script v2) de UN-SPIDER (s.f.) para la determinación del VHI, en el cual se indica el mes y el año que se requiera para el estudio.

En la colección MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061(Didan, 2021) se cuenta con una banda específica con el NDVI, lo cual ahorra tiempo de procesamientos de las imágenes, tales como enmascarar las nubes, y la realización de operaciones, por lo que solo se realizó un recorte de la zona de estudio y se descargó la imagen. En la Figura 22 se muestran los resultados para el año 2017, mientras en la Figura 21 se muestra la simbología.

Valor	Vegetación	Color
-1 a 0	Planta muerta u objeto inanimado	Rojo
0 a 0.33	Planta enferma	Amarillo
0.33 a 0.66	Planta moderadamente saludable	Verde amarillo
0.66 a 1	Planta muy saludable	Verde

Figura 21. Símbología utilizada para el mapeo del NDVI (Cherlinka, 2020).

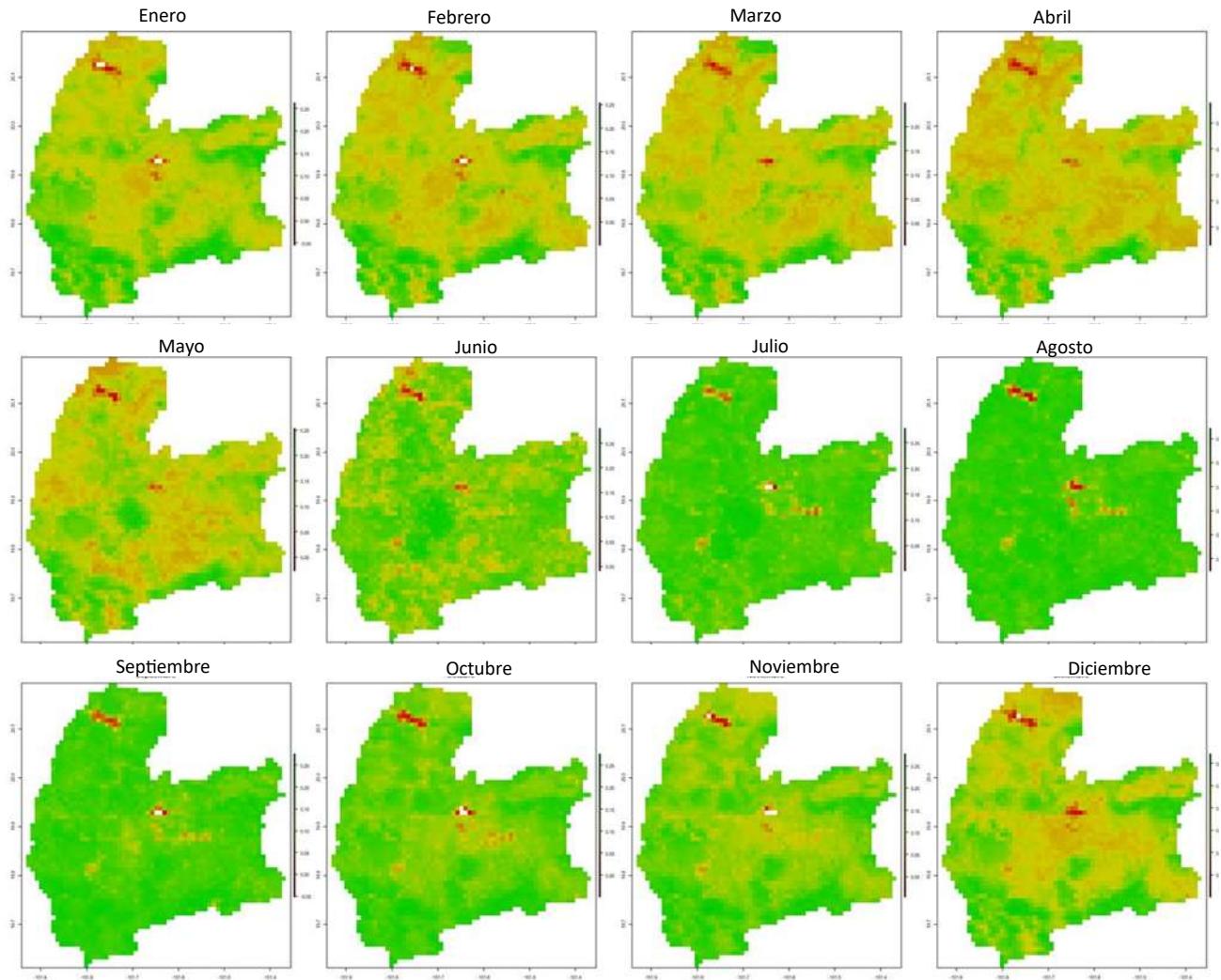


Figura 22. Mapas de extensión del NDVI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.

En la Figura 22 se observa un aumento de las plantas saludables después del inicio de la temporada de lluvias; comenzando a enfermarse en el mes de diciembre. También se puede observar que en las zonas donde se ubican las presas se muestran como “planta muerta u objeto inanimado”, del mismo modo se pueden ver ligeras variaciones en la forma de las presas, así como la falta de pixeles en las mismas, esto se puede deber al cambio de los volúmenes almacenados a lo largo del año.

Dentro del mismo código para el cálculo del VHI se obtienen el VCI y el TCI, el primero siendo obtenido del NDVI, mientras que el TCI se obtiene mediante la colección MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface

Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 (Wan, 2021), en las Figura 23 y Figura 24 se muestran estos resultados en GEE.

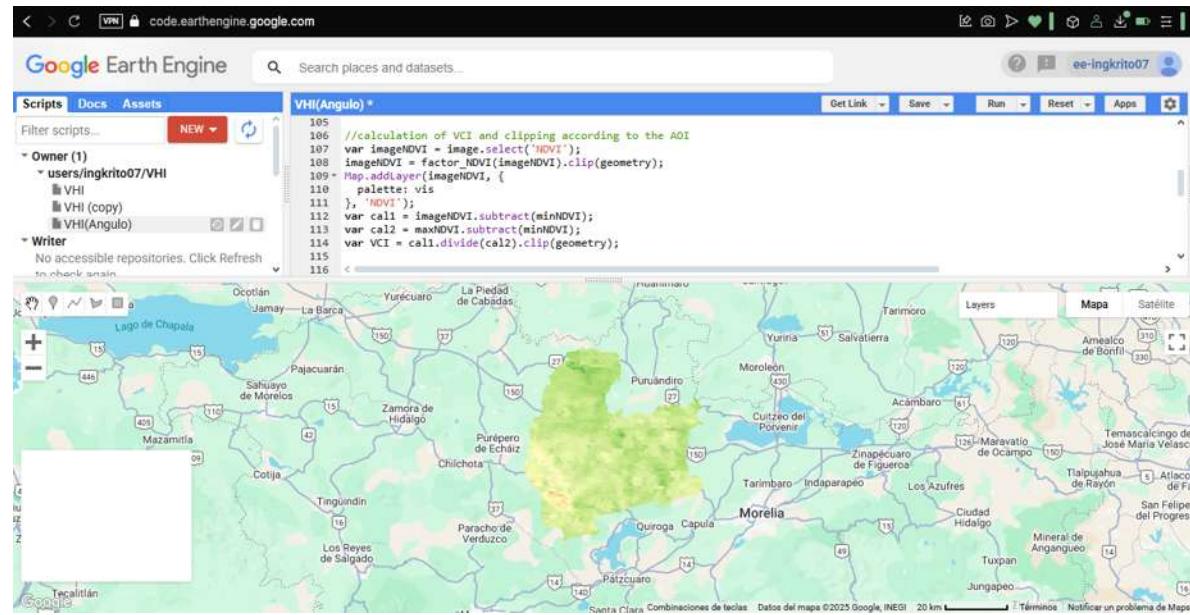


Figura 23. VCI obtenido en la plataforma GEE para diciembre del 2017

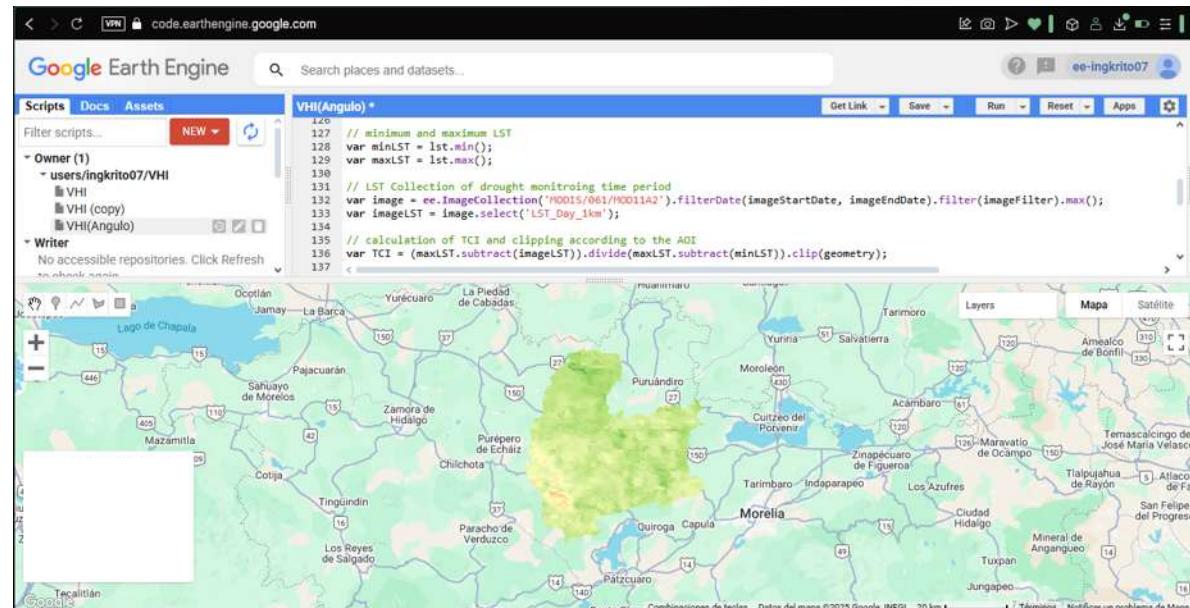


Figura 24. TCI obtenido en la plataforma GEE para diciembre del 2017

Con lo anterior, dentro del mismo código, se calculó el VHI, en la Figura 26 se presentan los resultados del VHI para el año 2017, mientras que en la Figura 25 se muestra la simbología.

Valor	Categoría	Color
< 10	Extremadamente seco	Rojo
10 - 20	Severamente seco	Naranja
20 - 30	Moderadamente seco	Amarillo
30 - 40	Levemente seco	Verde
> 40	Sin sequía	Verde

Figura 25. Símbología utilizada para el mapeo del VHI (Kogan, 1995a).

Debido a que el VHI es un subproducto del NDVI, los resultados muestran un comportamiento muy similar a los anteriormente presentados, la sequía disminuye en los meses correspondientes a la temporada de lluvias, sin embargo, en el VHI se puede observar zonas más secas que en el NDVI.

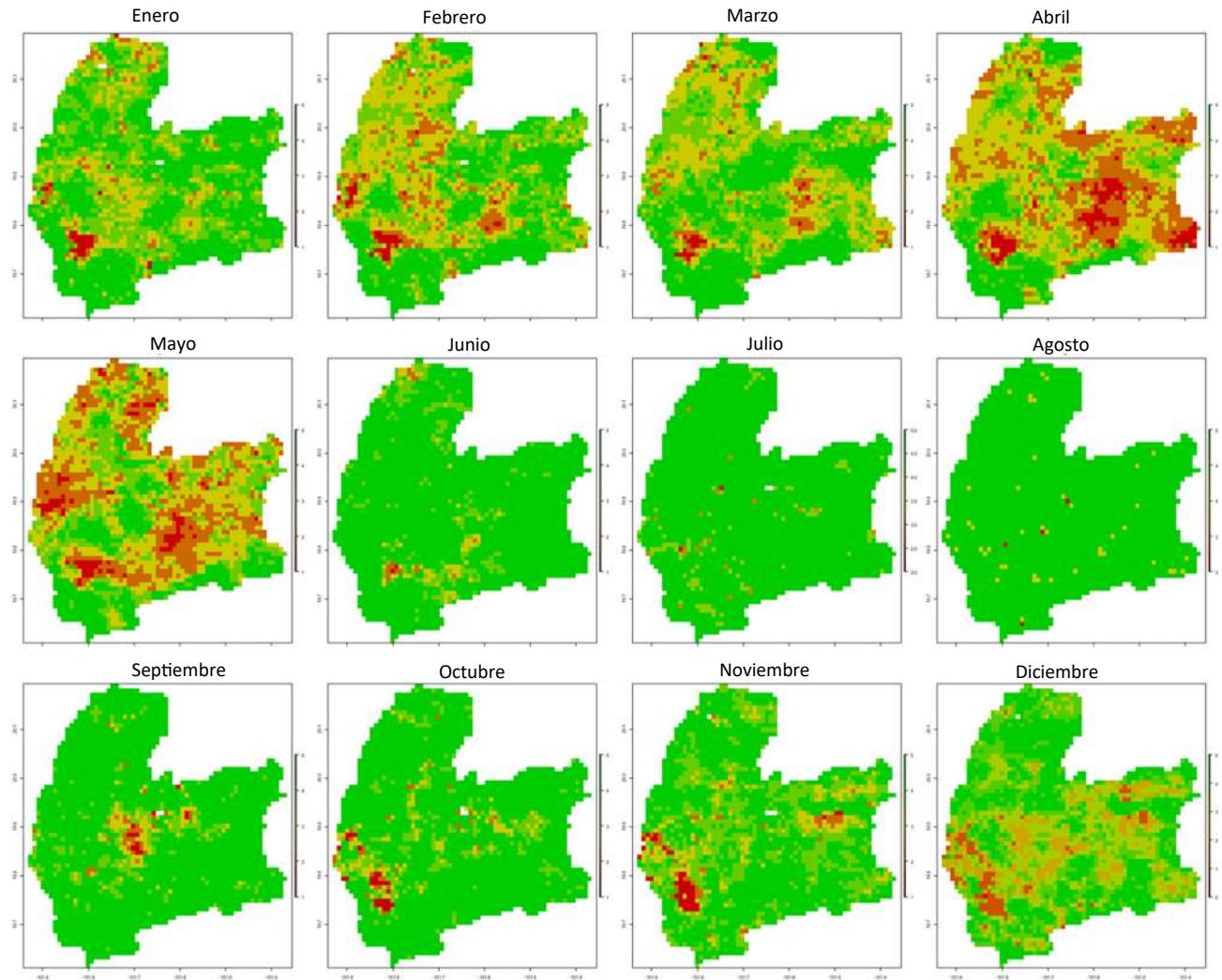


Figura 26. Mapas de extensión del VHI para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.

10.3 Monitor de sequías

Una vez obtenidos los índices, estos se estandarizaron en un sistema de información geográfico, esta estandarización toma como referencia el SPI. Para la estandarización se hicieron cálculos de media y desviación estándar para tener una escala uniforme. Una vez realizada la estandarización se hizo un promedio de los mapas en el mismo sistema de información geográfica, haciendo uso de la calculadora raster, obteniendo así el monitor de sequía para la cuenca, esto se realizó de manera mensual.

En la Figura 28 se observa los resultados del monitor para el año del 2017 y en la Figura 27 se muestra la simbología para el monitor de sequías.

Valor	Categoría	Color
4	Extremadamente seco	Rojo
3	Severamente seco	Naranja
2	Moderadamente seco	Amarillo
1	Levemente seco	Verde
0	Sin sequía	Verde oscuro

Figura 27. Simbología utilizada para el mapeo del monitor de sequías.

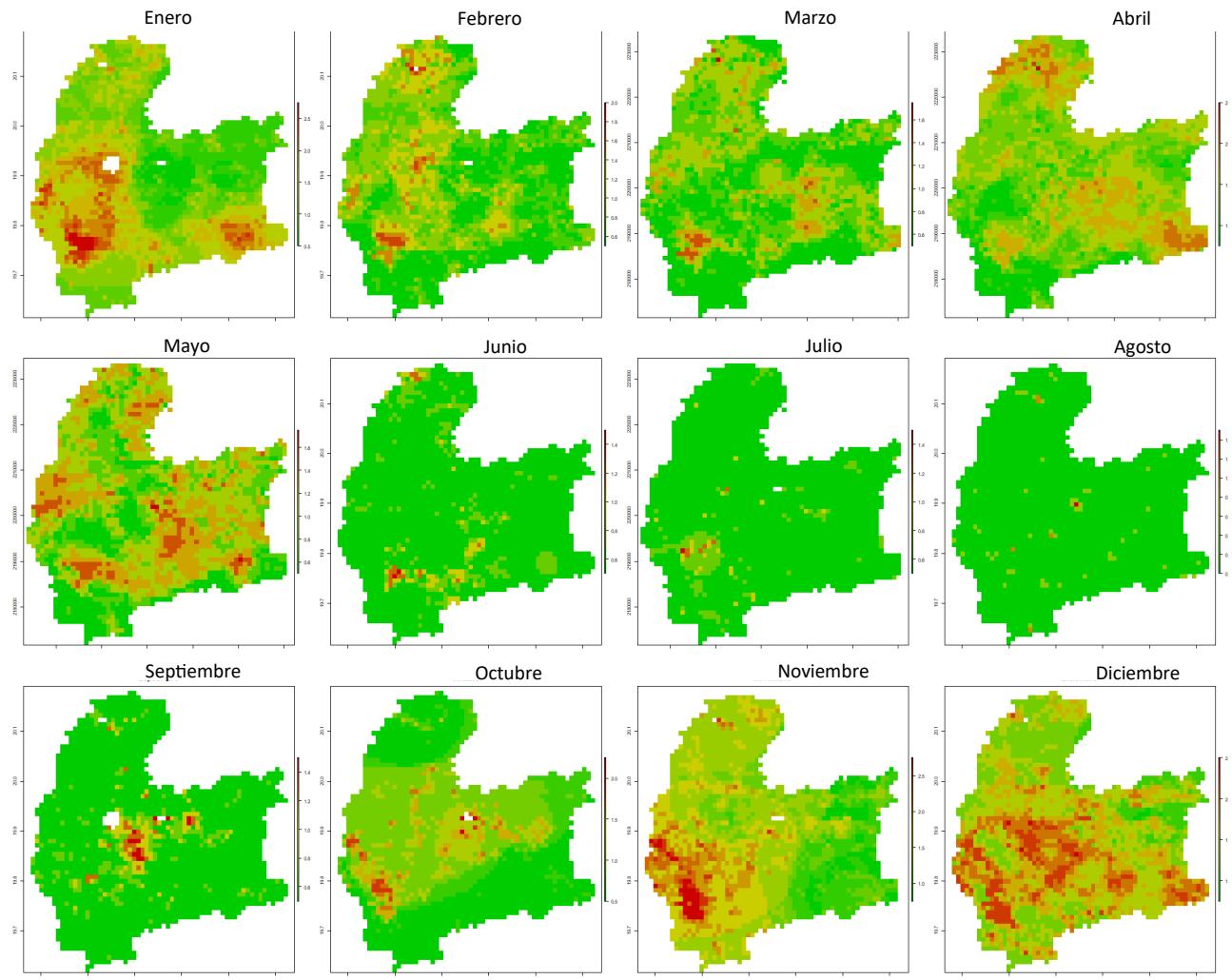


Figura 28. Monitor de Sequías para el año 2017 en la cuenca del río Angulo.

10.4 Vulnerabilidad

Los datos obtenidos de diversas instituciones gubernamentales se normalizaron y posteriormente se hizo una ponderación, con esto se realizaron los índices de vulnerabilidad, económica, social y ambiental. Estos índices se mapean en un SIG para un mayor entendimiento espacial.

10.4.1 Vulnerabilidad ambiental

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF), dentro de la cuenca de estudio existen dos cuencas (Figura 29). La cuenca del Río Angulo termina donde se ubica la presa “Melchor Ocampo”, siendo la cuenca predominante; la cuenca Lerma 5 corresponde únicamente a la parte norte de la cuenca, después de la presa “Melchor Ocampo”.

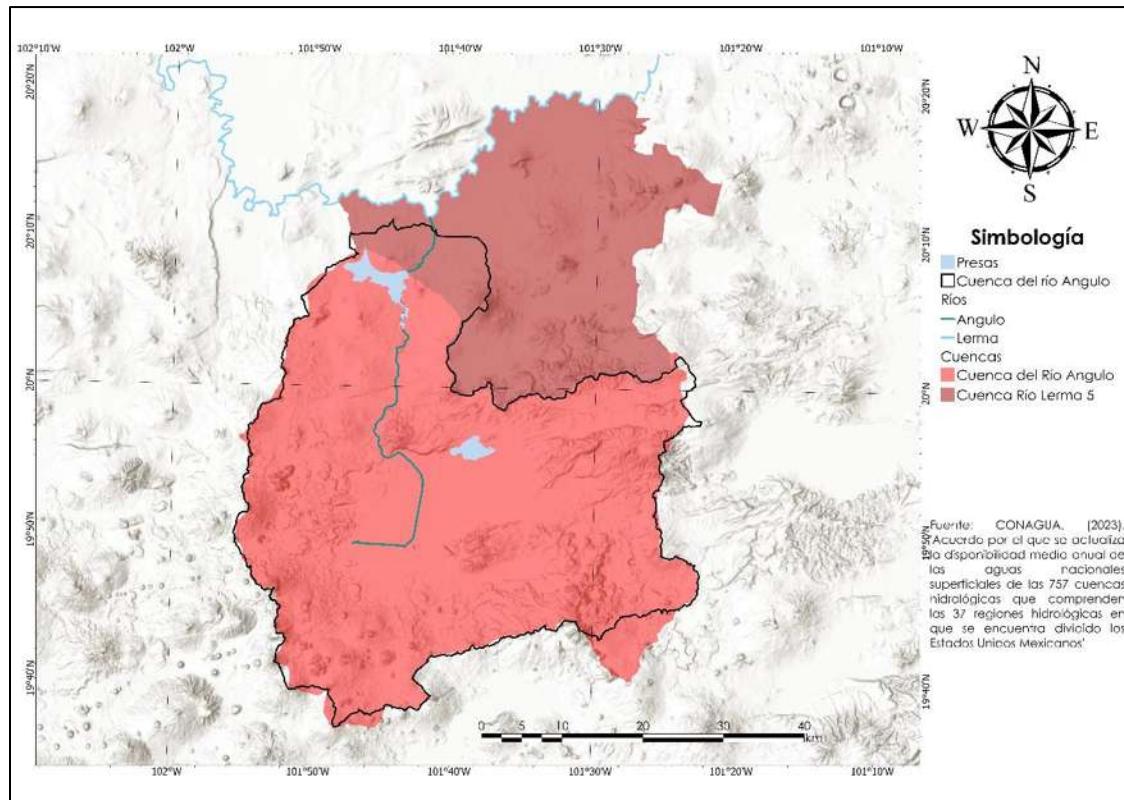


Figura 29. Cuenca dentro de la zona de estudio (CONAGUA, 2023b).

Conforme al “ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los

Estados Unidos Mexicanos”(CONAGUA, 2023b), publicado en el DOF, la cuenca del Río Angulo tiene una disponibilidad de -0.37 millones de metros cúbicos anuales y la cuenca Lerma 5 tiene una disponibilidad de -2.33 millones de metros cúbicos anuales, encontrándose ambas cuencas en una condición de déficit. Siendo más vulnerable la parte correspondiente a la cuenca Lerma 5.

La cuenca del río Angulo, se encuentra entre dos acuíferos (Figura 30), en la parte sur se encuentra el acuífero de Zacapu y en la parte norte se encuentra el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad.

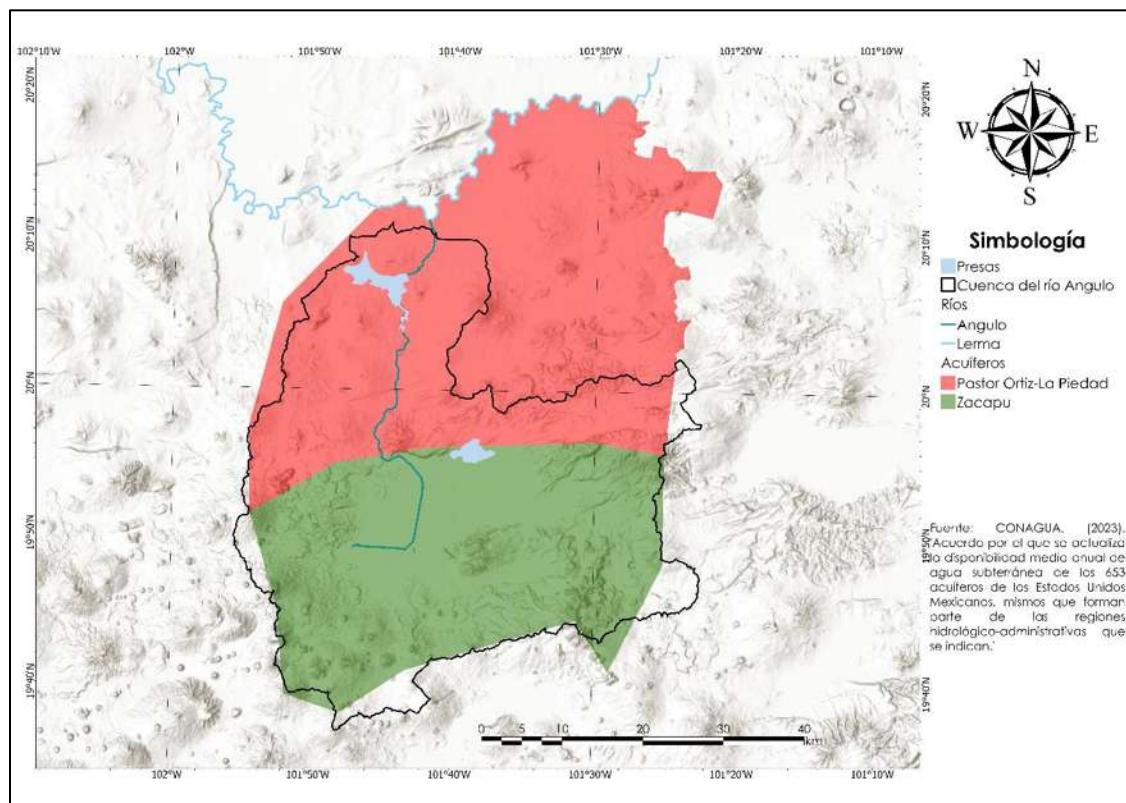


Figura 30. Acuíferos en la cuenca del río Angulo (CONAGUA, 2023a).

En el “ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican” (CONAGUA, 2023a), el acuífero Zacapu tiene una disponibilidad media anual de 26.82 millones de metros cúbicos, teniendo una condición de disponibilidad; mientras que el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad se

encuentra en una condición de sobreexplotado con una disponibilidad media anual de -87.99 millones de metros cúbicos. Dando a entender que los municipios que están dentro del acuífero Pastor Ortiz-La Piedad son más vulnerables.

Ya que se trata de un trabajo relacionado con sequías, los dos indicadores anteriores, están contemplados en los tres tipos de vulnerabilidad.

Siguiendo con los indicadores de vulnerabilidad ambiental, se tiene la superficie erosionada, ya que las zonas afectadas por la erosión son más vulnerables ante las sequías, porque este problema causa pérdidas en la tierra productiva, el cual se agrava cuando el suelo y la vegetación están secos, o no existe algún tipo de vegetación por la falta de lluvia por un largo tiempo. En la Figura 31 se muestran las áreas afectadas por la erosión dentro de la cuenca.

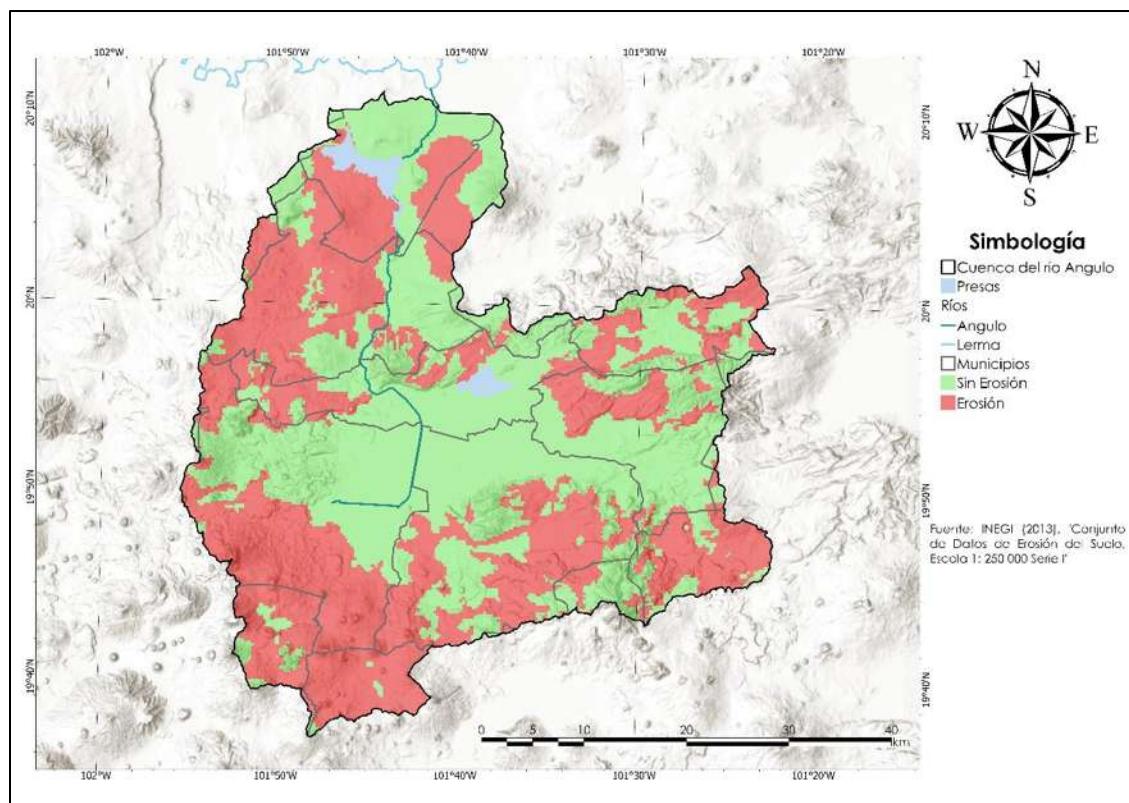


Figura 31. Áreas afectadas por erosión (INEGI, 2013).

Se puede apreciar que en las zonas correspondientes a los módulos de riego no presentan erosión, siendo las áreas con menos pendiente de la cuenca.

Dentro de la cuenca el 48.2 % presenta erosión. En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de erosión por municipio.

Tabla 11. Área erosionada por municipio.

Municipio	Área Total (km ²)	Área Erosionada (km ²)	Área Erosionada (%)
Angamacutiro	174.05	79.24	45.5
Coeneo	382.49	166.12	43.4
Chucandiro	12.51	2.89	23.1
Erongaricuaro	71.65	69.35	96.8
Huaniqueo	195.18	59.26	30.4
Jimenez	194.72	58.01	29.8
Morelia	94.89	71.99	75.9
Morelos	124.68	59.86	48.0
Nahuatzen	72.61	58.21	80.2
Panindicuaro	281.25	163.44	58.1
Penjamillo	22.42	11.59	51.7
Purépeo	2.38	0.98	41.0
Puruandiro	78.27	29.64	37.9
Quiroga	34.99	10.98	31.4
Zacapu	394.03	187.77	47.7

El siguiente indicador es el área afectada por incendios forestales, la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales aumentan cuando existen condiciones de sequía, ya que, con la falta de humedad relativa y el aumento de temperatura, los bosques son más susceptibles a quemarse, y las áreas secas y dañadas son más vulnerables ante las sequías. En la Figura 32 se muestran los incendios forestales que se presentaron en la cuenca en el año 2023.

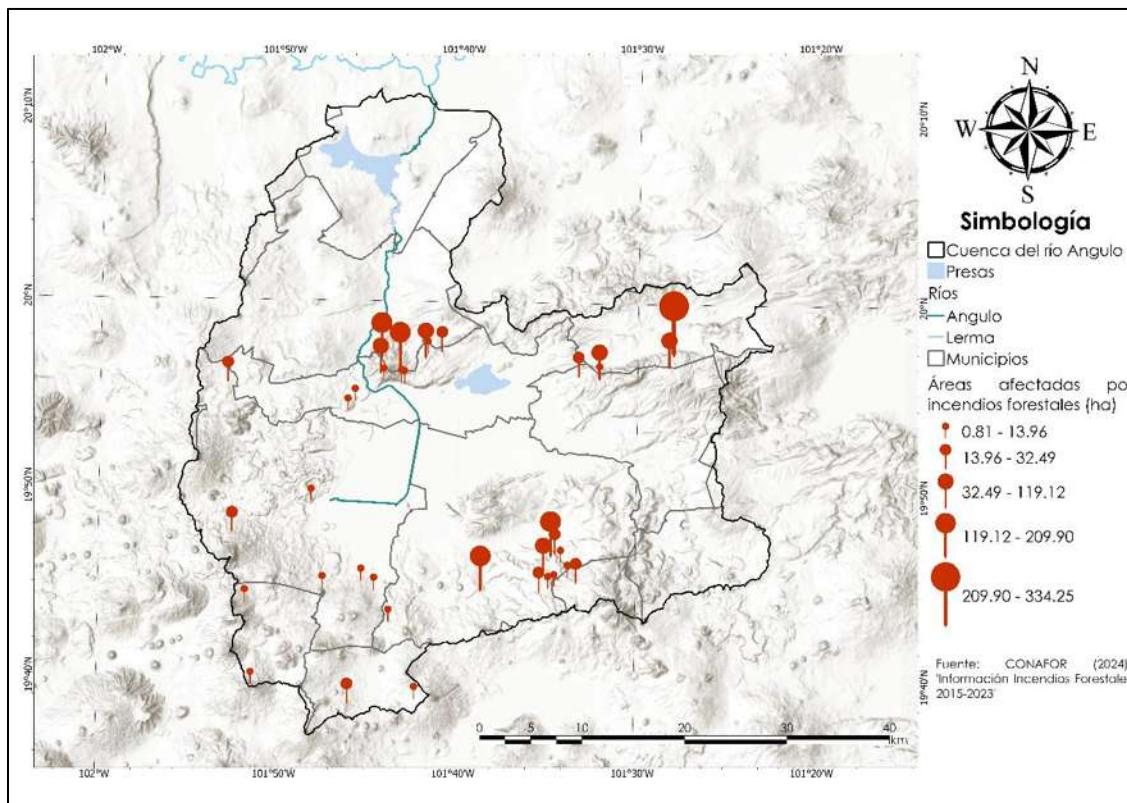


Figura 32. Incendios forestales y áreas afectadas por incendios foráneos en la cuenca del río Angulo (CONAFOR, 2023).

El mayor incendio presentado en la zona fue en el municipio de Morelos, con un área afectada de 334.25 ha; sin embargo, la mayor concentración de los incendios se presenta en la zona centro-norte del municipio de Jiménez y en la zona sureste de Coeneo.

Durante el 2023 existieron actividades de reforestación dentro de la cuenca, por lo que para suplir este indicador se recurrió a usar el área de cobertura vegetal, en la Figura 33 se muestra el área de cobertura vegetal dentro de la cuenca.

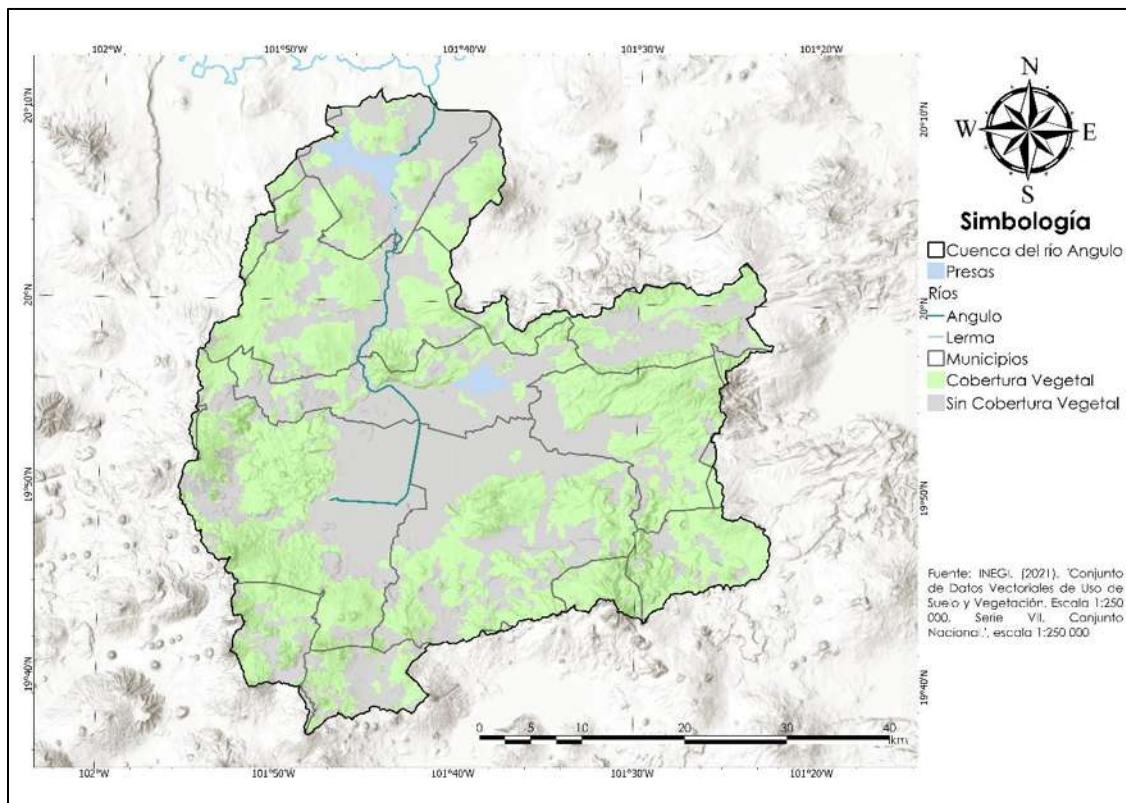


Figura 33. Área de cobertura vegetal de la cuenca (INEGI, 2021).

El 56% de la cuenca tiene cobertura vegetal, principalmente en las zonas altas de la cuenca. En la Tabla 12 se muestra el porcentaje de cobertura vegetal por municipio.

Tabla 12. Área de cobertura vegetal por municipio.

Municipio	Área Total (km ²)	Área de Cobertura Vegetal (km ²)	Área de Cobertura Vegetal (%)
Angamacutiro	174.05	57.16	32.8
Coeneo	382.49	188.57	49.3
Chucandiro	12.51	9.88	79.0
Erongaricuaro	71.65	34.01	47.5
Huaniqueo	195.18	137.71	70.6
Jimenez	194.72	66.78	34.3
Morelia	94.89	77.96	82.2

Morelos	124.68	65.73	52.7
Nahuatzen	72.61	50.70	69.8
Panindicuaro	281.25	181.91	64.7
Penjamillo	22.42	13.73	61.2
Purépeo	2.38	1.45	60.8
Puruandiro	78.27	56.19	71.8
Quiroga	34.99	33.01	94.3
Zacapu	394.03	212.68	54.0

Dentro de la cuenca existen dos áreas naturales protegidas, la Laguna de Zacapu, cuerpo de agua de donde nace el río Angulo, y la Alberca de los Espinos, en el municipio de Jiménez (Figura 32).

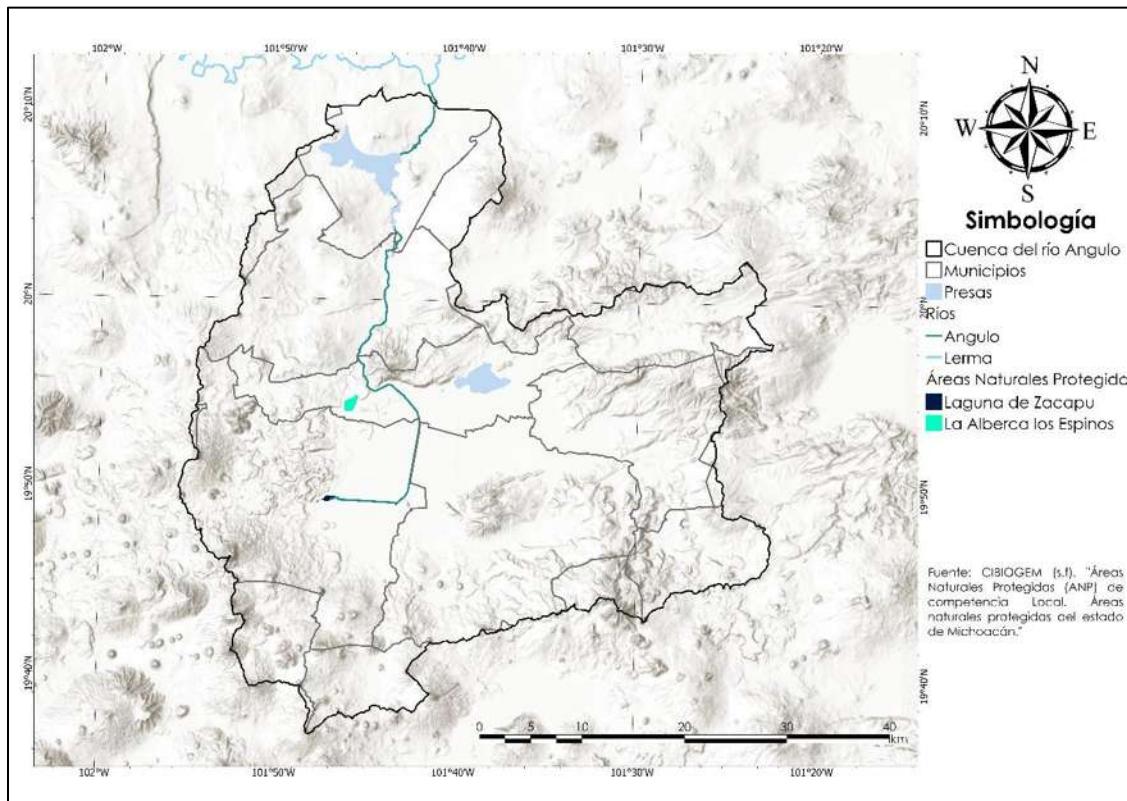


Figura 34. Áreas naturales protegidas dentro de la cuenca del río Angulo (CIBIOGEM, s.f.).

Los indicadores fueron normalizados para facilitar su comparación. Por ejemplo, en el caso del “Grado de explotación de los acuíferos”, se tomaron

tres valores iniciales: 4.06, 2.125 y 0.19. Para realizar la normalización, se utilizó el valor 2.125 como referencia y se aplicó una fórmula para ajustar los demás valores con respecto a este[35]:

$$\frac{(2.125 - 0.19)}{(4.06 - 0.19)} \quad [35]$$

Los resultados de las normalizaciones se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Normalización de indicadores ambientales.

Municipio	Grado de explotación de cuencas	Grado de explotación de acuíferos	Superficie erosionada (%)	Superficie afectada por incendios forestales (%)
Amangancutiro	1	1	0.30	0
Coeneo	0	0	0.28	0.44
Chucándiro	0	0	0	0
Erongarícuaro	0	0	1	0.15
Huaniqueo	0	0	0.10	0.35
Jiménez	0	0.5	0.09	0.88
Morelia	0	0	0.72	0
Morelos	0	0	0.34	1
Nahuatzen	0	0	0.77	0.017
Panindícuaro	0	1	0.48	0
Penjamillo	0	1	0.39	0
Purépeo	0	1	0.24	0
Puruándiro	1	1	0.20	0
Quiroga	0	0	0.11	0.11
Zacapu	0	0	0.33	0.05

Continuación de la Tabla 13.

Municipio	Áreas naturales protegidas (%)	Cobertura Vegetal (%)
Amangancutiro	1	1
Coeneo	1	0.7
Chucándiro	1	0.2
Erongarícuaro	1	0.8
Huaniqueo	1	0.4
Jiménez	0	1.0
Morelia	1	0.2
Morelos	1	0.7
Nahuatzen	1	0.4
Panindícuaro	1	0.5
Penjamillo	1	0.5
Purépeo	1	0.5
Puruándiro	1	0.4
Quiroga	1	0
Zacapu	0.80	0.66

Para realizar la ponderación, nuevamente tomamos de ejemplo el “Grado de explotación de los acuíferos”, primero se calcula la desviación estándar, que para este caso es de 0.48, posteriormente se saca el inverso de la desviación estándar, que es 2.08. Se necesitan los inversos de los otros indicadores, los cuales se suman, para esta vulnerabilidad la suma es de 18.95. La ponderación del “Grado de explotación de acuíferos” se muestra en la expresión

$$\frac{1}{(0.48 * 18.95)} \quad [36]$$

La suma de las ponderaciones de todos los indicadores debe resultar en 1. En la Tabla 14 se muestra el resultado de todas las ponderaciones.

Tabla 14. Ponderación de los indicadores ambientales

	Ponderación
Grado de explotación de cuencas	0.15
Grado de explotación de los acuíferos	0.11
Superficie erosionada (%)	0.19
Superficie afectada por incendios forestales (%)	0.16
Áreas naturales protegidas (%)	0.2
Cobertura Vegetal (%)	0.19

Este valor de ponderación se multiplica por cada valor de los indicadores, sumándolos al final para obtener el valor de vulnerabilidad, esta vulnerabilidad se muestra en la Figura 35.

La vulnerabilidad cambia de acuerdo con el acuífero y la cuenca, localizándose la zona más vulnerable ambientalmente hablando, en el municipio de Angamacutiro. La zona correspondiente al acuífero de Zacapu es menos vulnerable, donde las zonas con cobertura vegetal y sin erosión son las menos vulnerables, sin embargo, al presentarse la mayoría de los incendios forestales, estas zonas son más vulnerables que el resto del acuífero.

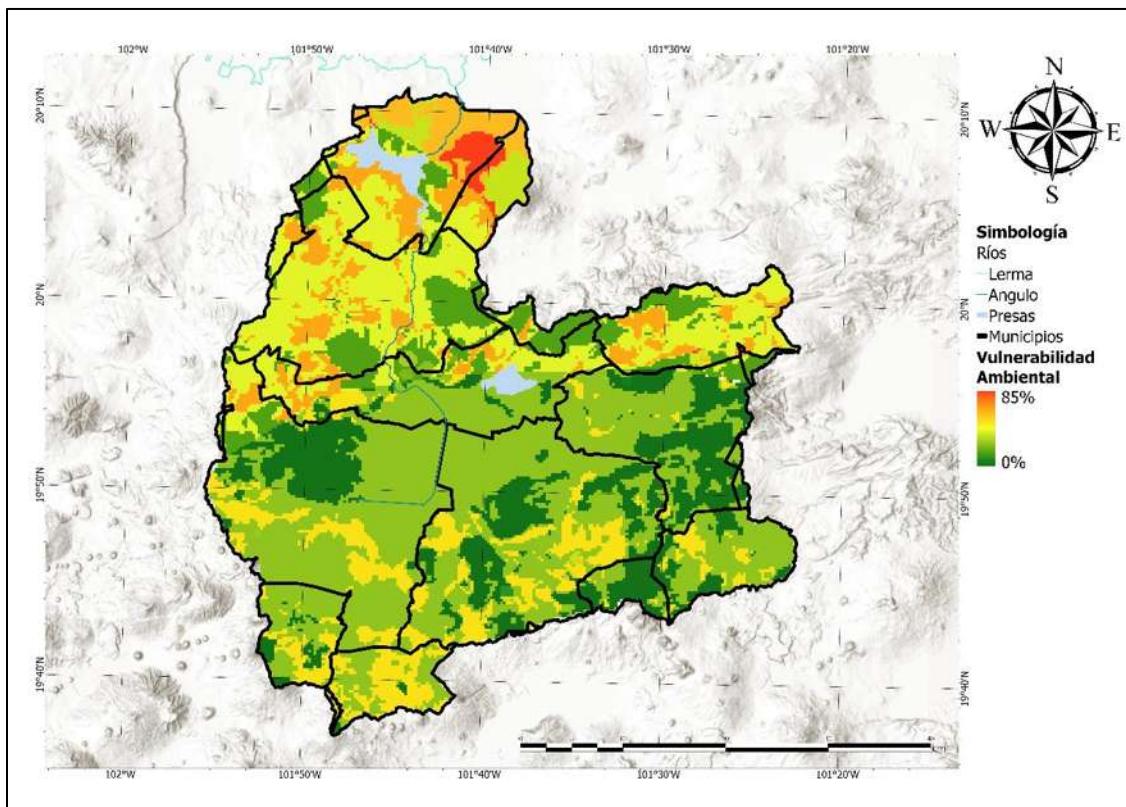
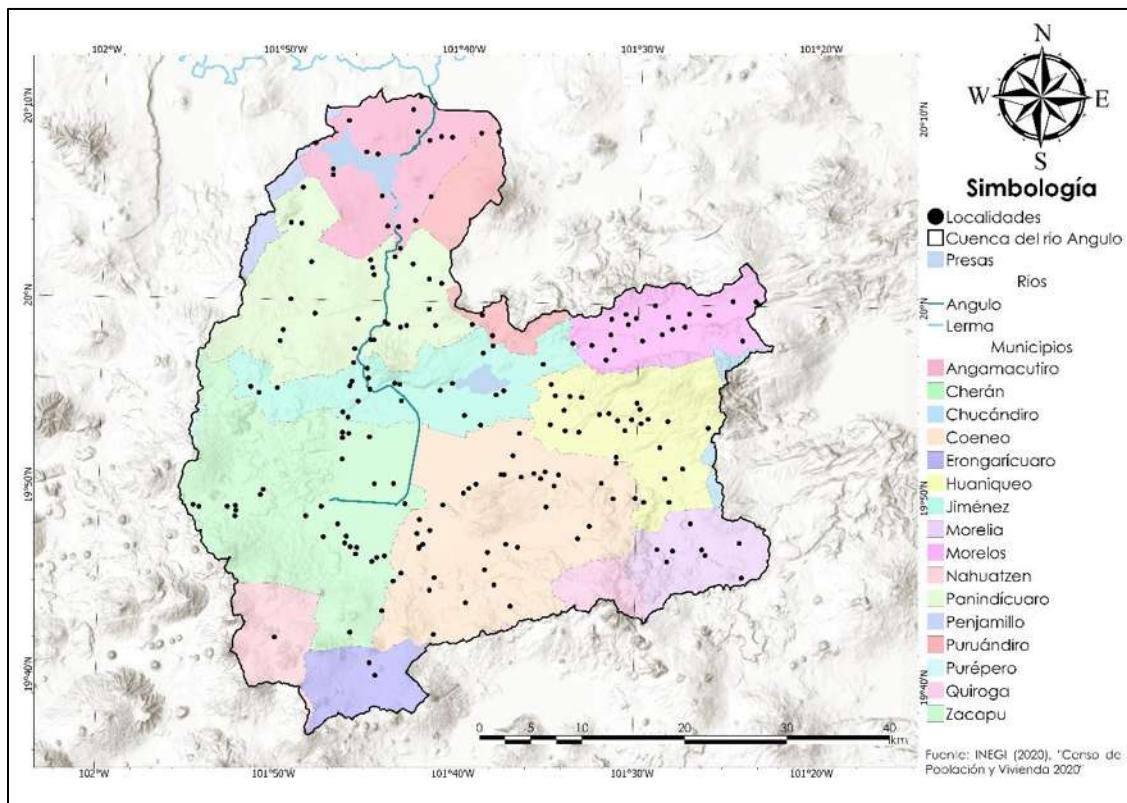


Figura 35. Vulnerabilidad ambiental en la cuenca del río Angulo.

10.4.2 Vulnerabilidad social

Con base en los datos del censo de población y vivienda (INEGI, 2020), se elaboraron diversos mapas que reflejan los indicadores de vulnerabilidad. Para ello, se realizó una interpolación utilizando el método IDW, tomando como referencia los puntos señalados en la Figura 36 mediante IDW y preservando los valores determinados en el SIG.



La población en condiciones de pobreza es una información a escala municipal, por lo que la representación de los datos difiere a la de los otros indicadores de vulnerabilidad social. En la Figura 37 se muestra la distribución de la población en condiciones de pobreza.

Para el caso de la porción del municipio de Morelia, ya que la capital del estado se encuentra dentro del municipio y es ahí donde se concentra la mayor parte de la población, el porcentaje de población en condiciones de pobreza no es representativo de las localidades rurales de la periferia, por lo que se le dio el valor de Huaniqueo, ya que estas localidades de Morelia están más cerca a dicho municipio.

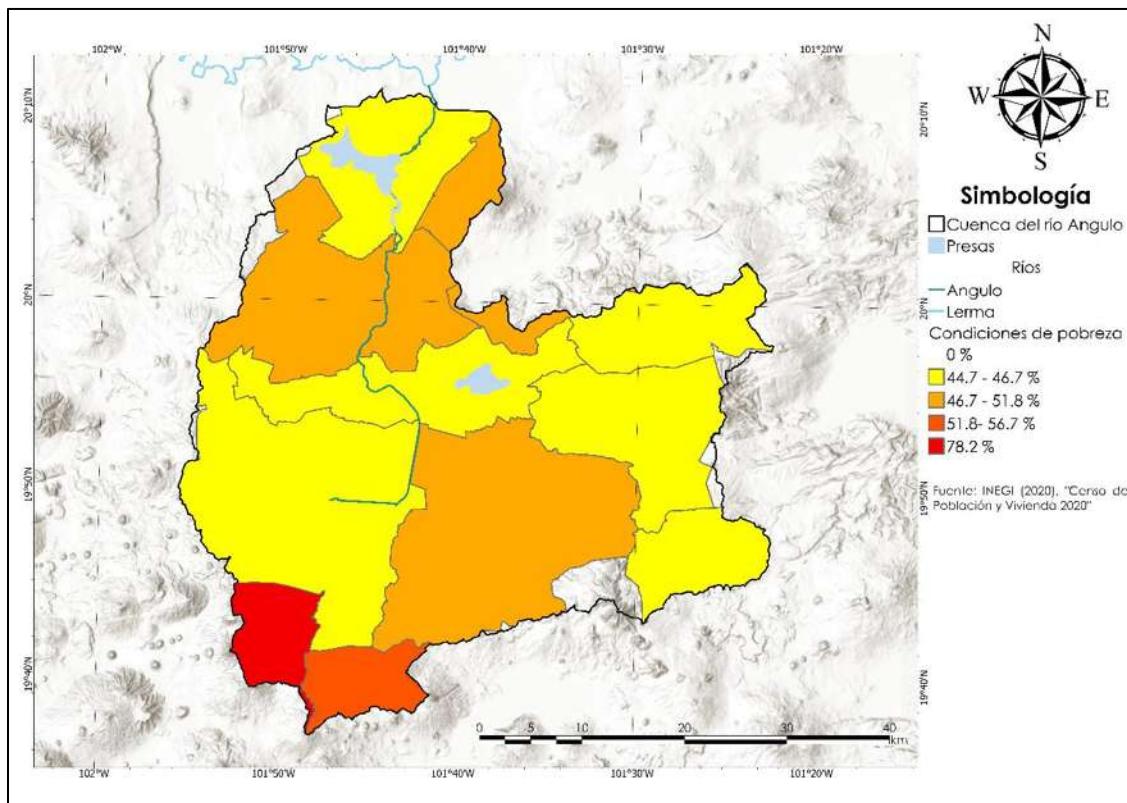


Figura 37. Condiciones de pobreza dentro de la cuenca (INEGI, 2020).

El municipio con mayor cantidad de población en condiciones pobreza es Nahuatzen, con un 78.2 %, seguido por Erongarícuaro con un 56.7 %. La mayoría de los municipios tienen un porcentaje entre el 44 y 50 % de condiciones de pobreza. Los municipios que aparecen con un 0 %, no cuentan con población dentro de la cuenca.

El análisis de los otros indicadores se hizo a partir de las localidades, ya que esta información si está en dicha escala. Los indicadores que se determinaron a escala de localidad son: población sin afiliación a servicios de salud, población analfabeta, viviendas sin agua entubada, sin excusado, sin drenaje, sin energía eléctrica, viviendas con piso de tierra y los años promedio de escolaridad.

En la Figura 38 se muestra la distribución de las poblaciones sin afiliación a servicios de salud, ya sea públicos o privados, la mayoría de la población cuenta con este servicio. En Huaniqueo se encuentra la localidad “Casa de Alto” con 100 % de población sin afiliación, sin embargo, también cuenta con la única localidad con 0 % de población si afiliación siendo esta “La

Tejería". La distribución muestra a Coeneo como el municipio con mayor cantidad de población sin afiliación a servicios de salud.

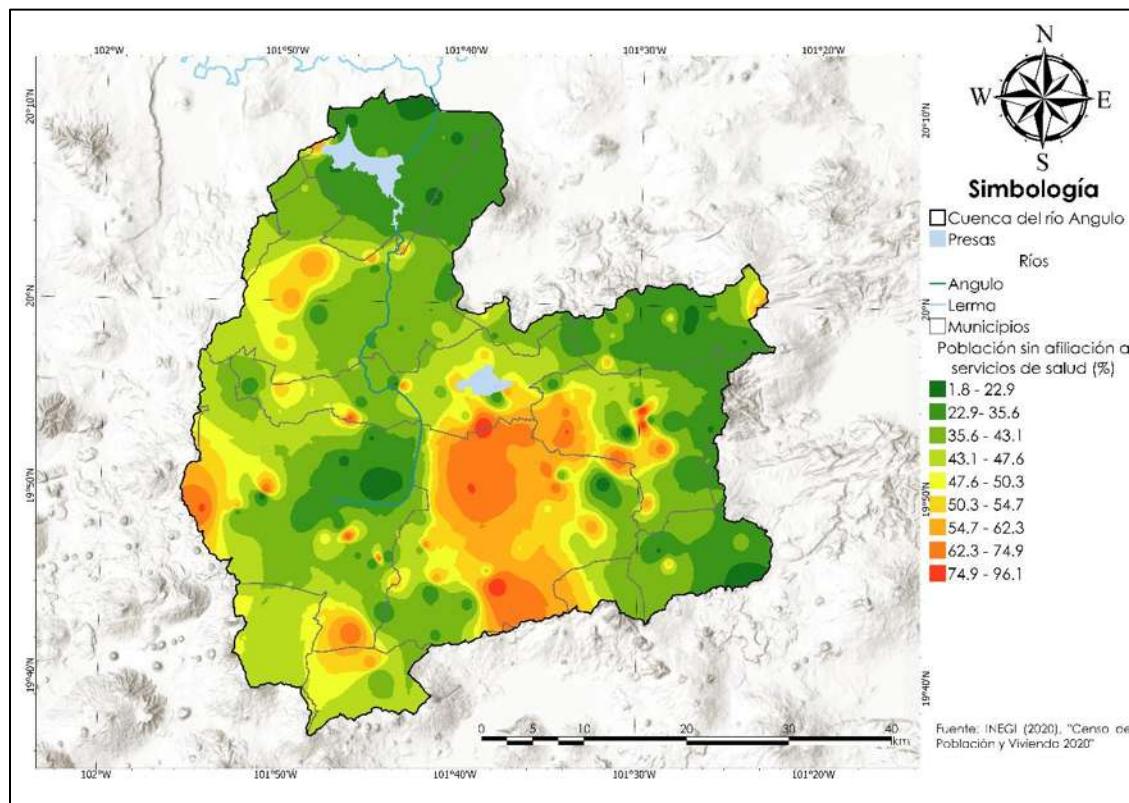


Figura 38. Población sin afiliación a servicios de salud dentro de la cuenca (INEGI, 2020).

Dentro de la cuenca, la mayoría de la población se encuentra entre 5 y 14 % de analfabetismo (Figura 39), siendo "La Yerbabuena (La Cieneguita)", en el municipio de Huaniqueo, la población con mayor porcentaje de analfabetismo con un 41.67 %. Por otro lado, se encuentran 13 localidades con el 0 % de analfabetismo.

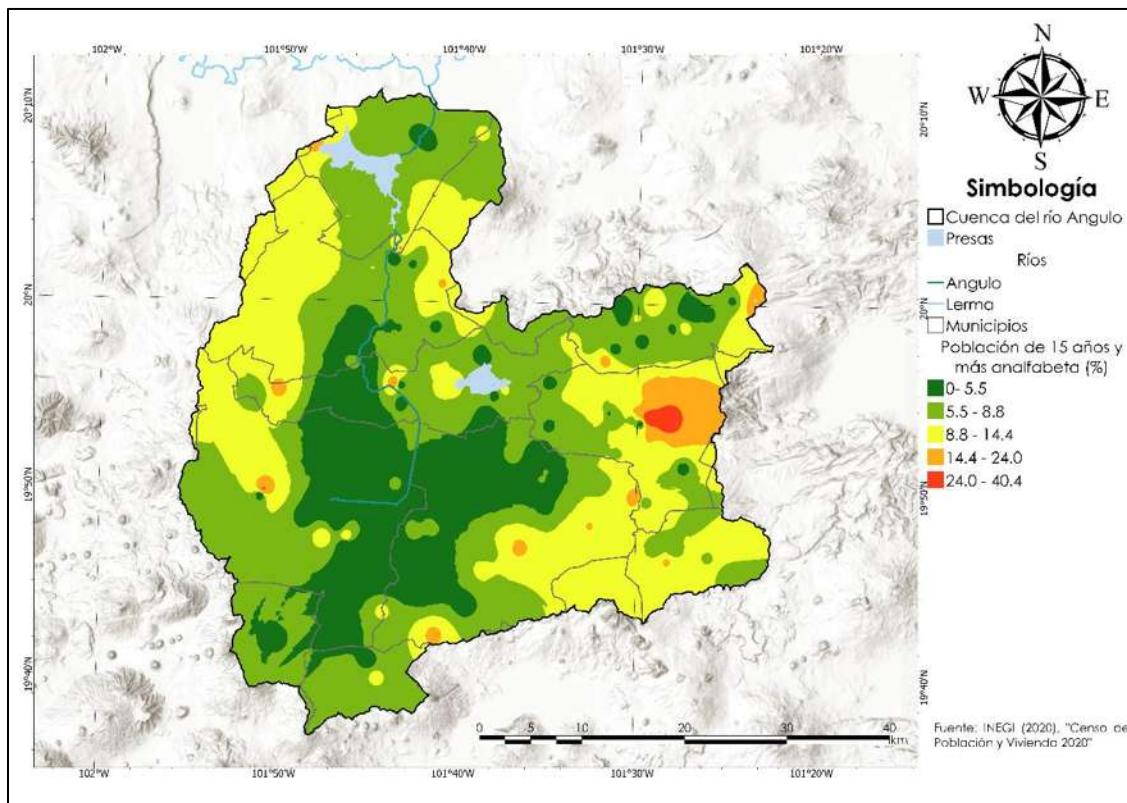


Figura 39. Población analfabeta dentro de la cuenca del río Angulo (INEGI, 2020).

Dentro de la cuenca existen 69110 viviendas, el 38.2 % de las mismas pertenecen a Zacapu, 15 % a Coeneo, 10.3 % a Panindícuaro, 10.2 % a Jiménez, 7.9 % a Angamacutiro, 6.8 % a Huaniqueo, 4.5 % a Morelos, 3.5 % a Puruándiro, 2.1 % a Morelia, 0.8 % a Nahuatzen y 0.7 % a Erongarícuaro.

Aproximadamente el 51 % de las localidades dentro de la cuenca cuenta con el 100 % de las viviendas con agua entubada (Figura 40). La localidad “Barranca Honda” de Zacapu tiene un 94.4 % de viviendas sin agua potable, siendo la localidad más vulnerable en este punto, seguida por la localidad “El Coyote” del mismo municipio con un 72.6 % de viviendas sin este servicio.

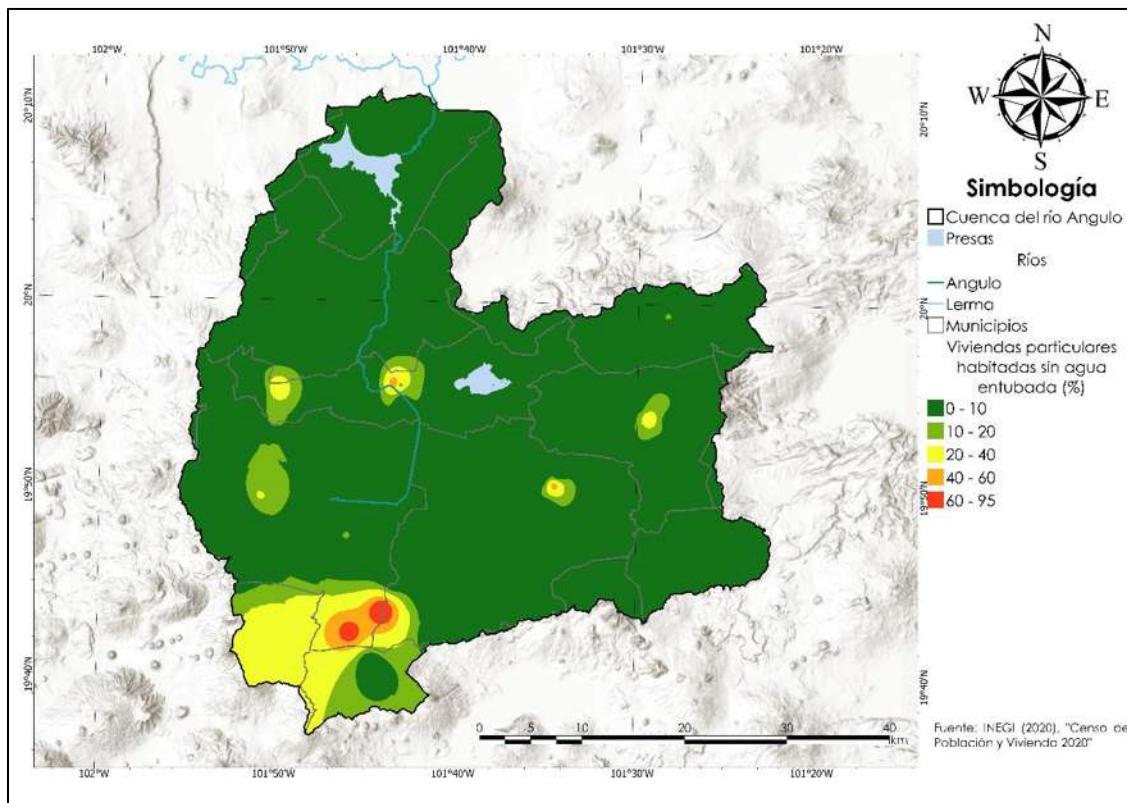


Figura 40. Viviendas sin servicio de agua entubada (INEGI, 2020).

En la Figura 41 se muestra el porcentaje de viviendas sin drenaje; es una distribución muy parecida a la del porcentaje de viviendas sin agua entubada (Figura 40), sin embargo, solo el 16 % de las localidades cuentan con un 100 % de viviendas con drenaje. La localidad con el mayor porcentaje de viviendas sin drenaje es “La Higuera” del municipio de Coeneo con un 75 %.

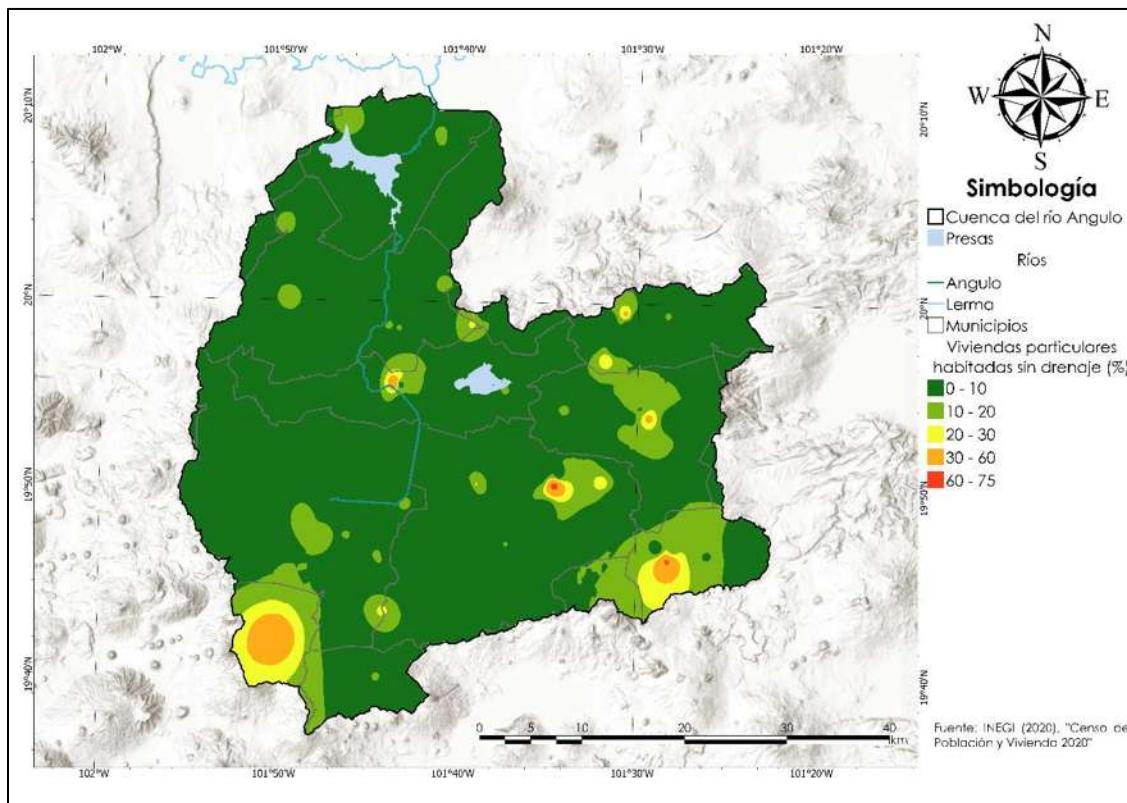


Figura 41. Viviendas sin drenaje (INEGI, 2020).

Dentro de la cuenca se observa que la mayoría de las localidades tienen entre un 40 y 60 % de viviendas sin excusado (Figura 42). Dentro de la cuenca solo existen 2 localidades con el 100 % de viviendas con excusado, siendo estas “El Pantano [Brecha a Tarejero]” del municipio de Zacapu, y “La Raya” del municipio de Jiménez. Por otro lado, la población con mayor cantidad de viviendas sin este servicio es “San Antonio Púcuaro [Fraccionamiento]”, del municipio de Zacapu, con un 95.4 %.

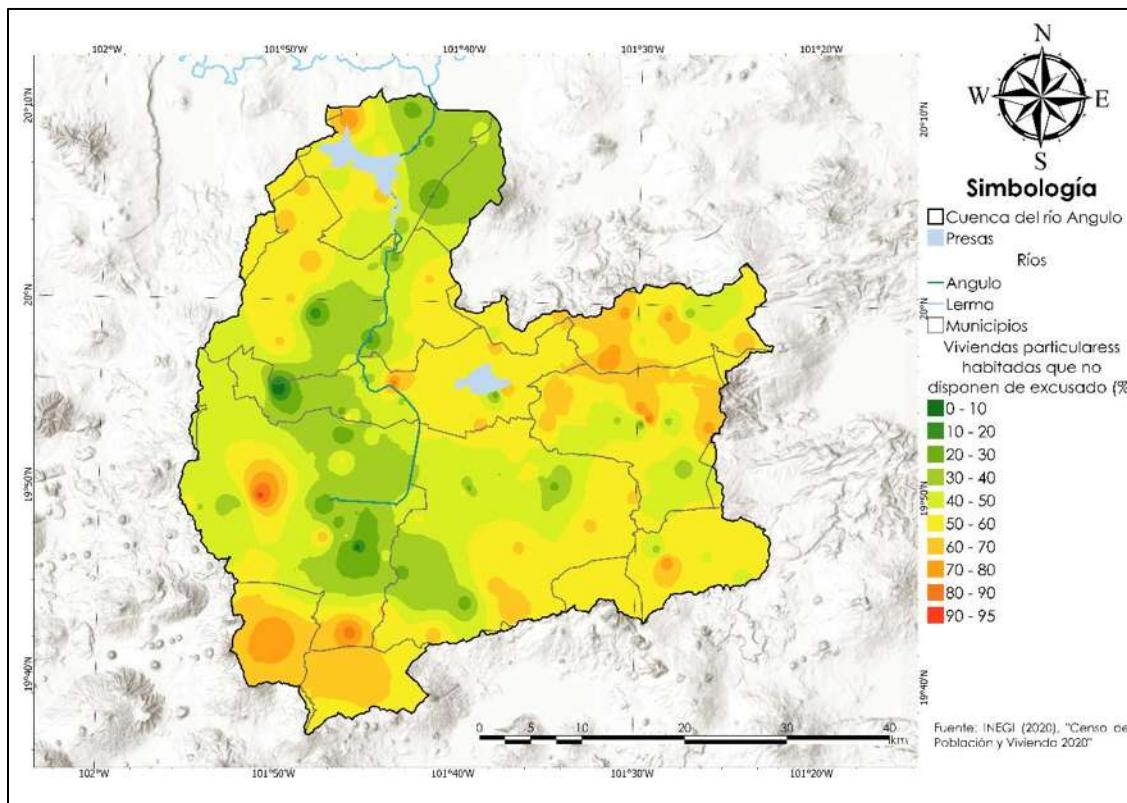


Figura 42. Viviendas sin excusado (INEGI, 2020).

En lo que se refiere a las viviendas sin energía eléctrica (Figura 43), el 56 % de las localidades de la cuenca cuenta con este servicio al 100 %, así mismo la cuenca se encuentra en su mayoría entre el 0 y el 2.8 %, sin embargo, la localidad con mayor porcentaje de viviendas sin energía eléctrica es “El Borrego” en Zacapu, con un 14.29 %.

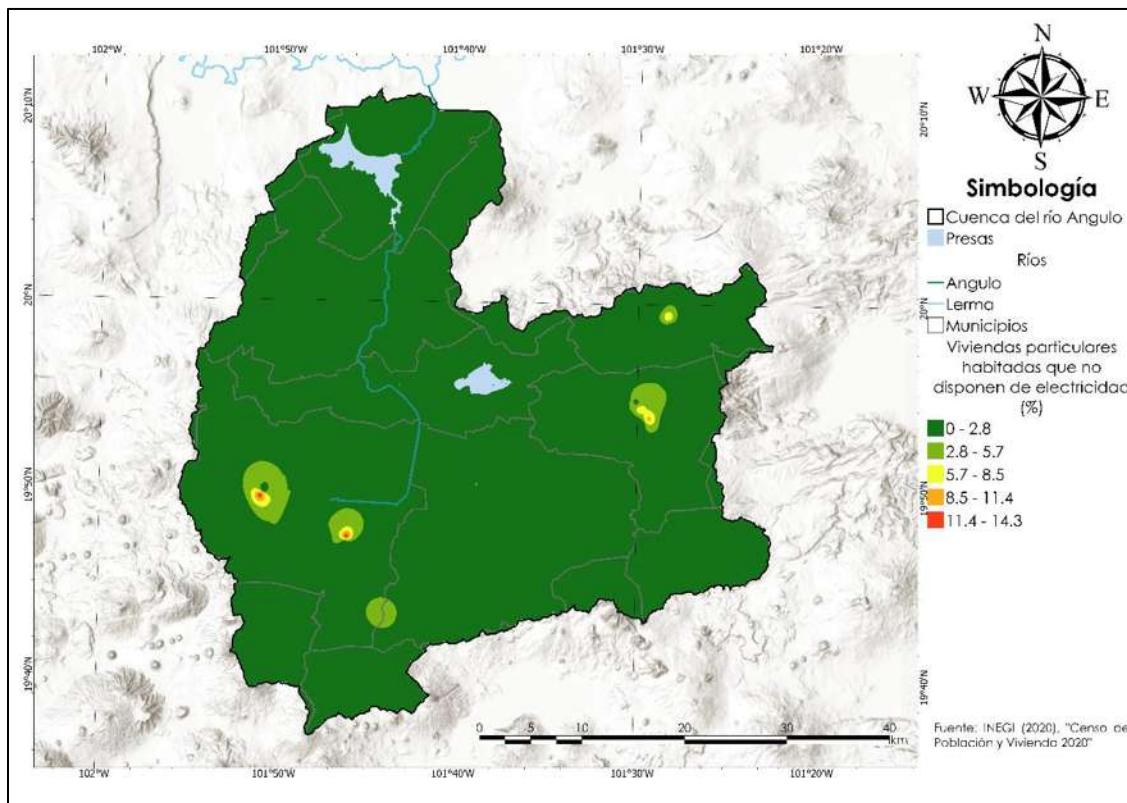


Figura 43. Viviendas sin energía eléctrica (INEGI, 2020).

En cuanto a las viviendas con piso de tierra (Figura 44), el 25 % de las localidades no cuentan con piso de tierra en ninguna de sus viviendas, teniendo también que gran parte de las localidades se encuentran entre el 0 y el 5 %. La localidad con mayor porcentaje de viviendas con piso de tierra es “Vista Bella” del municipio de Zacapu, con un 41.6 %.

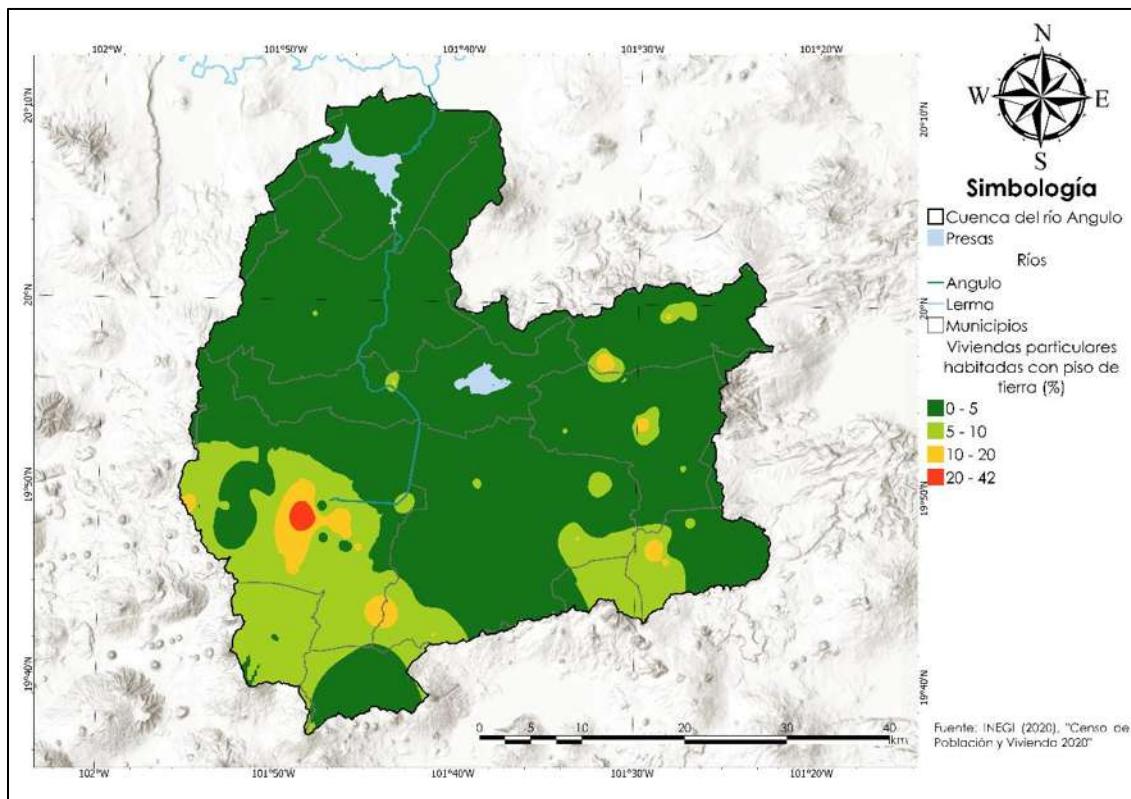


Figura 44. Viviendas con piso de tierra (INEGI, 2020).

El último de los indicadores de vulnerabilidad social es el promedio de años de escolaridad (Figura 45) teniendo como máximo 10.68 años de educación en la localidad de “Pueblo Viejo (Jacarandas)” en el municipio de Zacapu, y teniendo como mínimo 2 años en la localidad de “Casas de Alto” en Huaniqueo. La mayoría de la población se encuentra entre los 6 y 8 años de educación, lo cual corresponde a la educación primaria y parte de la secundaria, estando abajo del promedio nacional de 9.2, pero muy cercano al promedio estatal de 8.7 años.

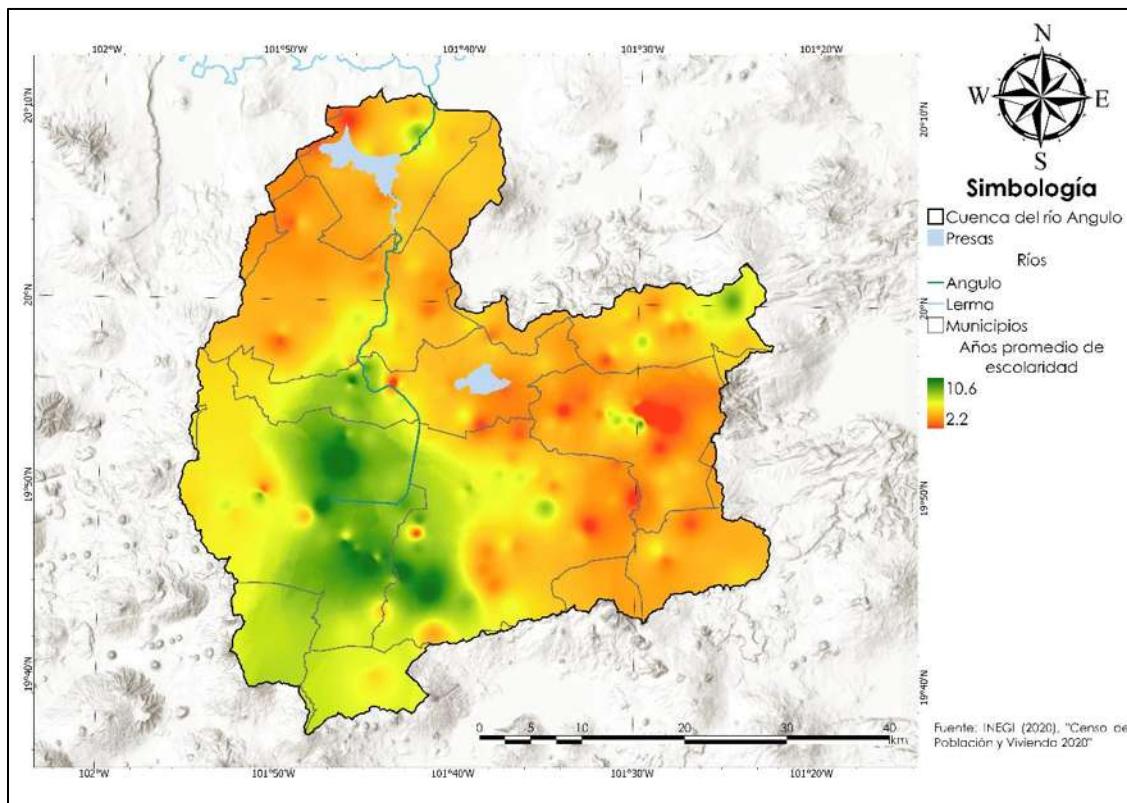


Figura 45. Años promedio de escolaridad (INEGI, 2020).

Los indicadores anteriores se normalizaron, para ejemplificar se muestra la normalización de “Viviendas con piso de tierra”; tenemos como valor máximo 41.67 y como mínimo 0, el valor de este indicador para la localidad de Zacapu es de 2.06, en la ecuación [37].

$$\frac{(2.06 - 0)}{(41.67 - 0)} \quad [37]$$

Para ponderar, utilizaremos “Viviendas con piso de tierra”; la desviación estándar es de 0.11, el inverso de la desviación estándar es de 8.86, y la suma de las desviaciones estándar es de 65.51. En la ecuación [38] se muestra la ponderación.

$$\frac{1}{(0.11 * 63.51)}$$

[38]

En la Tabla 15 se muestra la ponderación de los indicadores.

Tabla 15. Ponderación de indicadores sociales.

	Ponderación
Población en condiciones de pobreza	0.18
Población sin derecho a servicios de salud	0.09
Población analfabeta	0.11
Viviendas sin agua entubada	0.13
Viviendas sin drenaje	0.11
Viviendas sin excusado	0.09
Viviendas sin energía eléctrica	0.12
Viviendas con piso de tierra	0.14
Años promedio de escolaridad	0.10
Grado de explotación de las cuencas	0.07
Grado de explotación de los acuíferos	0.03

A continuación, se presenta el cálculo de la vulnerabilidad social (Figura 46).

Nuevamente se puede ver una diferencia de vulnerabilidad marcada por el cambio de acuífero, cuenca y municipio. El municipio más vulnerable es Nahuatzen, cabe aclarar que este municipio tiene únicamente dos localidades dentro de la cuenca, la marcada vulnerabilidad se puede ver dentro de los diversos indicadores, principalmente en la población en condiciones de pobreza (Figura 37). Después de Nahuatzen, el segundo municipio más vulnerable es Panindícuaro, aunque no tiene una vulnerabilidad tan alta como Nahuatzen.

Se pueden observar también que existen localidades puntuales que son más vulnerables.

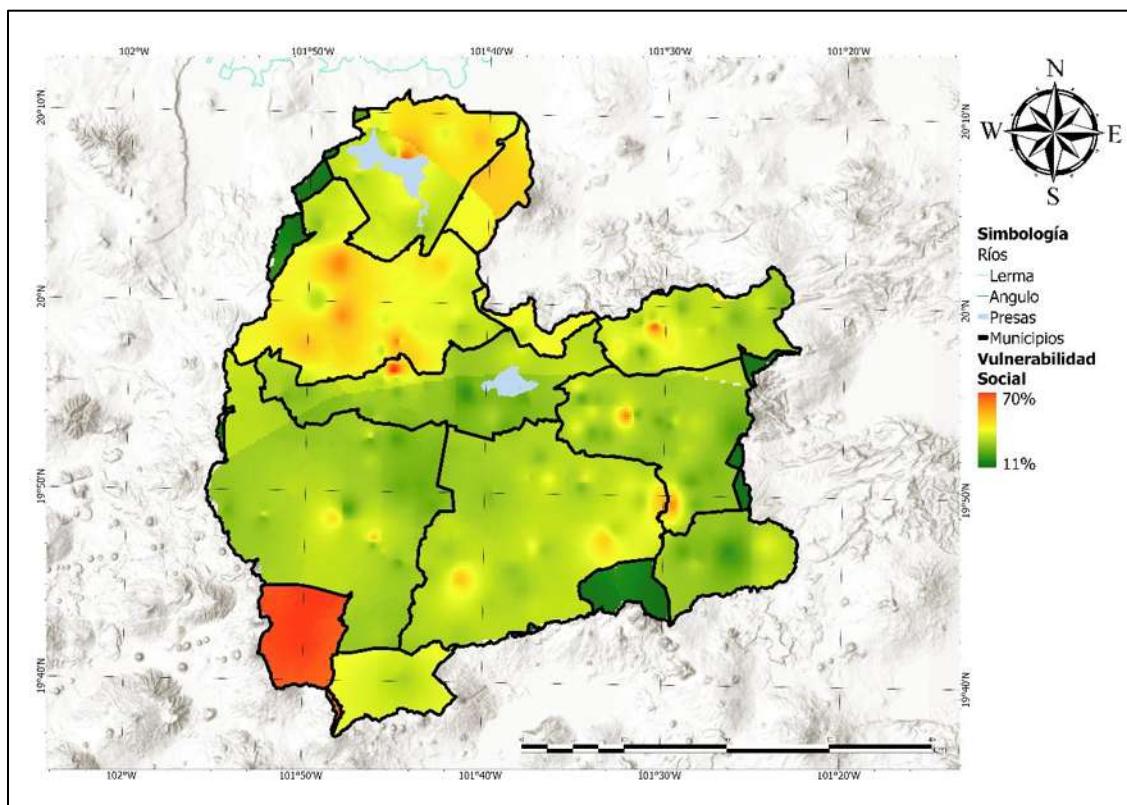


Figura 46. Vulnerabilidad social en la cuenca del río Angulo.

10.4.3 Vulnerabilidad económica

Los indicadores para determinar la vulnerabilidad económica son: densidad de población, población económicamente activa desocupada, el valor de la producción agrícola de riego y temporal, valor de la producción del

ganado en pie y la longitud de caminos. Estos indicadores se presentan a continuación.

El primer indicador es la densidad de población, mostrada en la. El municipio con mayor densidad de población es Zacapu con 189.94 hab/km², y el menor es Erongarícuaro con 14.92 hab/km². La mayoría de los municipios se encuentran entre 40 y 55 habitantes por km² (Figura 47).

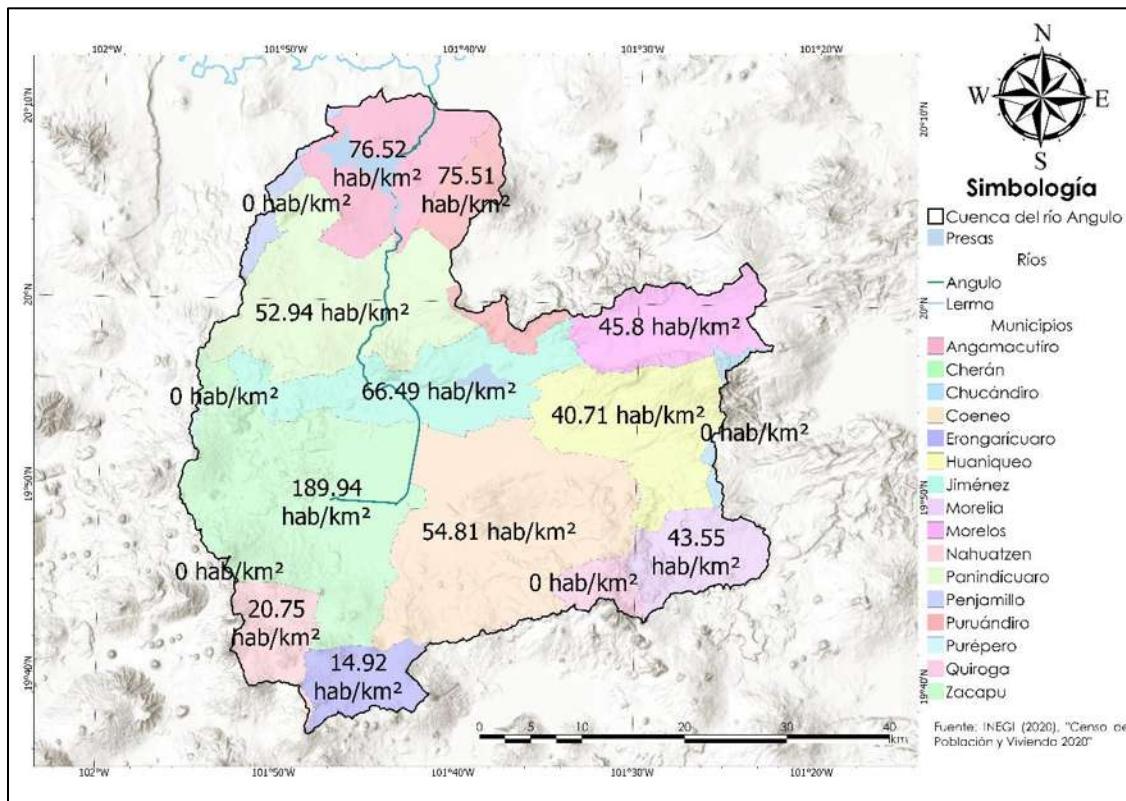
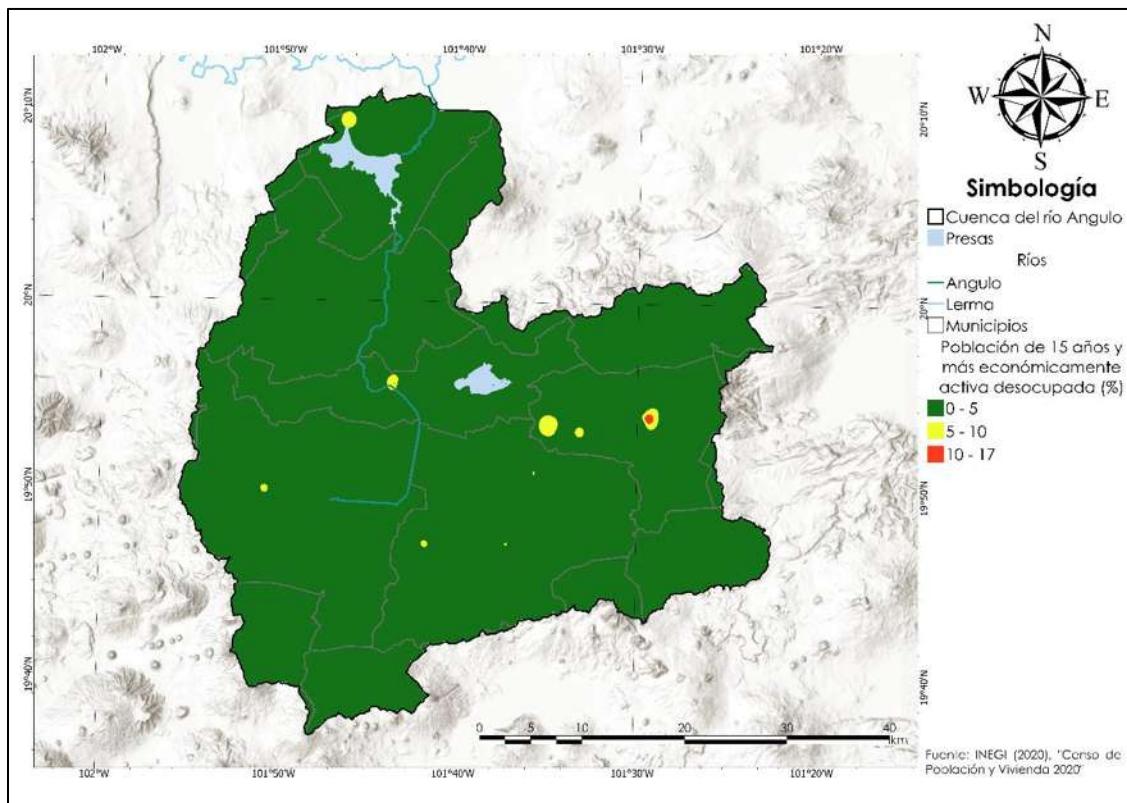


Figura 47. Densidad de población (hab/km²) (INEGI, 2020).

La población económicamente activa desocupada (Figura 48), es el único indicador económico que se hizo a partir de información local. El porcentaje dentro de la cuenca varía entre 0 y 16.47 %, siendo Morelia el municipio con el 0 % de población económicamente activa desocupada. Más del 50 % de la cuenca se encuentra entre el 7.32 y 10.98 %, esta población se encuentra en su mayoría en la parte sur de la cuenca, también se encuentra la localidad con mayor porcentaje, “La Yerbabuena (La Cieneguita)” con el 16.67 %.



Los siguientes indicadores son valor de la producción agrícola de riego y temporal (Figura 49) y el valor de la producción del ganado en pie (Figura 50). Cabe mencionar que estos dos indicadores son municipales, por lo que se tuvieron que adecuar estos indicadores de acuerdo con la cantidad de habitantes dentro de la cuenca. En las Tabla 16 y Tabla 17 se muestran los valores de cada uno de los indicadores.

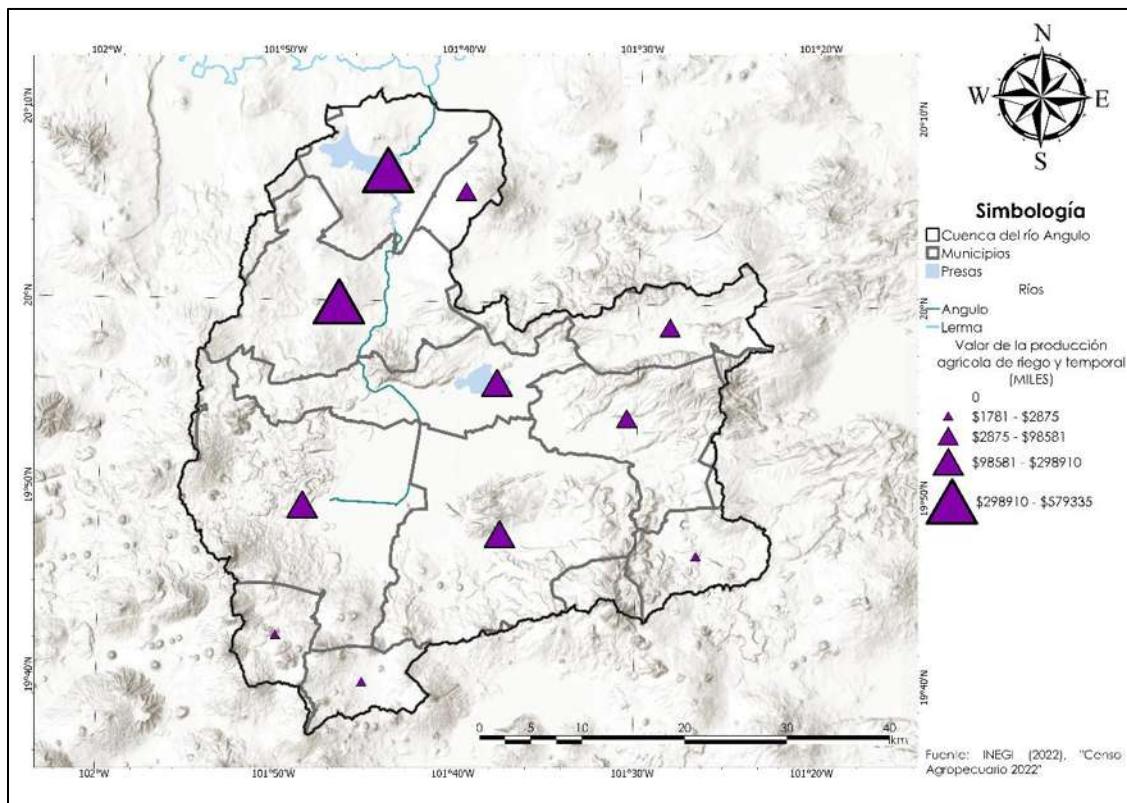


Figura 49. Valor de la producción agrícola de riego y temporal (INEGI, 2022).

Tabla 16. Valor de la producción agrícola de riego y temporal.

Municipio	Valor de la producción agrícola de riego y temporal (Miles de pesos mexicanos)
Amangancutiro	521406.79
Coeneo	162340.24
Erongarícuaro	2629.77
Huaniqueo	98581.00
Jiménez	224803.03
Morelia	1781.00
Morelos	48179.98
Nahuatzen	2875.26
Panindícuaro	579335.72
Puruándiro	57584.22
Zacapu	298910.61

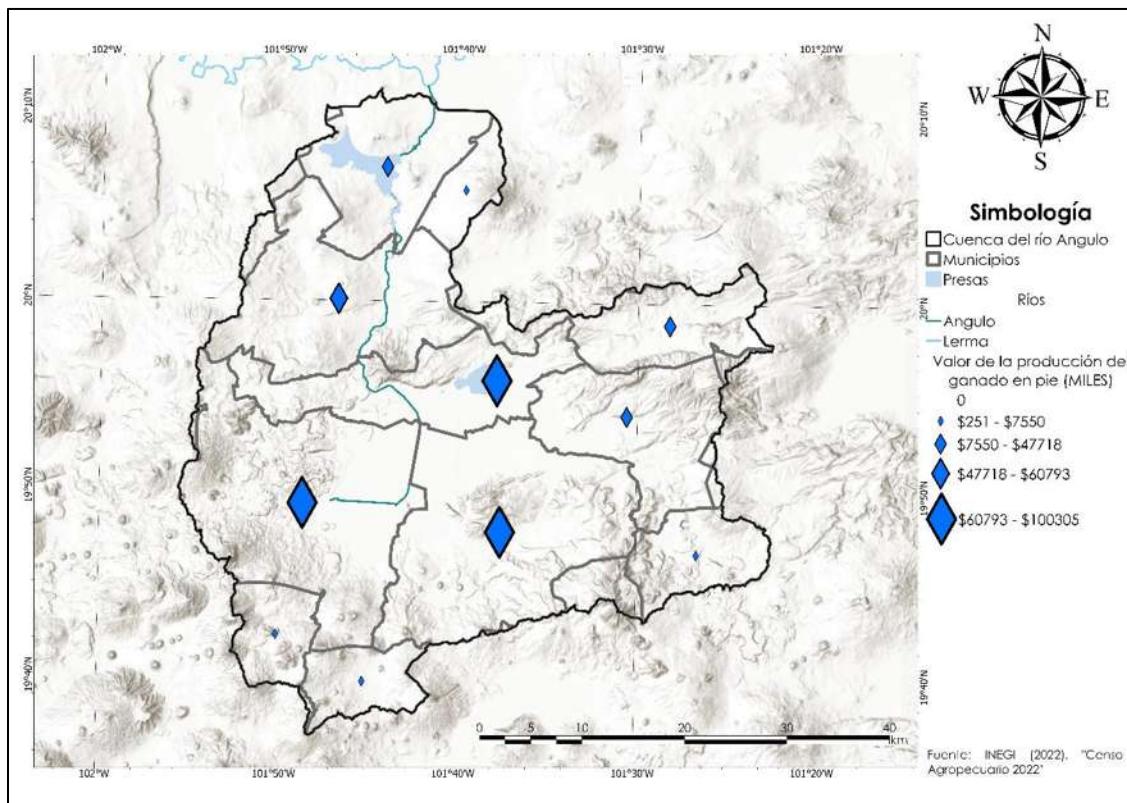


Figura 50. Valor de la producción del ganado en pie (INEGI, 2022).

Tabla 17. Valor de la producción del ganado en pie.

Municipio	Valor de la producción del ganado en pie (Miles de pesos mexicanos)
Amangancutiro	41313.78
Coeneo	92137.14
Erongarícuaro	852.46
Huaniqueo	47718.07
Jiménez	87275.86
Morelia	251.57
Morelos	36294.87
Nahuatzen	1033.99
Panindícuaro	60793.55
Puruándiro	7550.23
Zacapu	100305.19

El siguiente indicador es la longitud de caminos. En la Figura 51 se muestra la red vial de toda la cuenca, esta red vial conecta a todas las localidades dentro de la cuenca, no se presenta ninguna incomunicada.

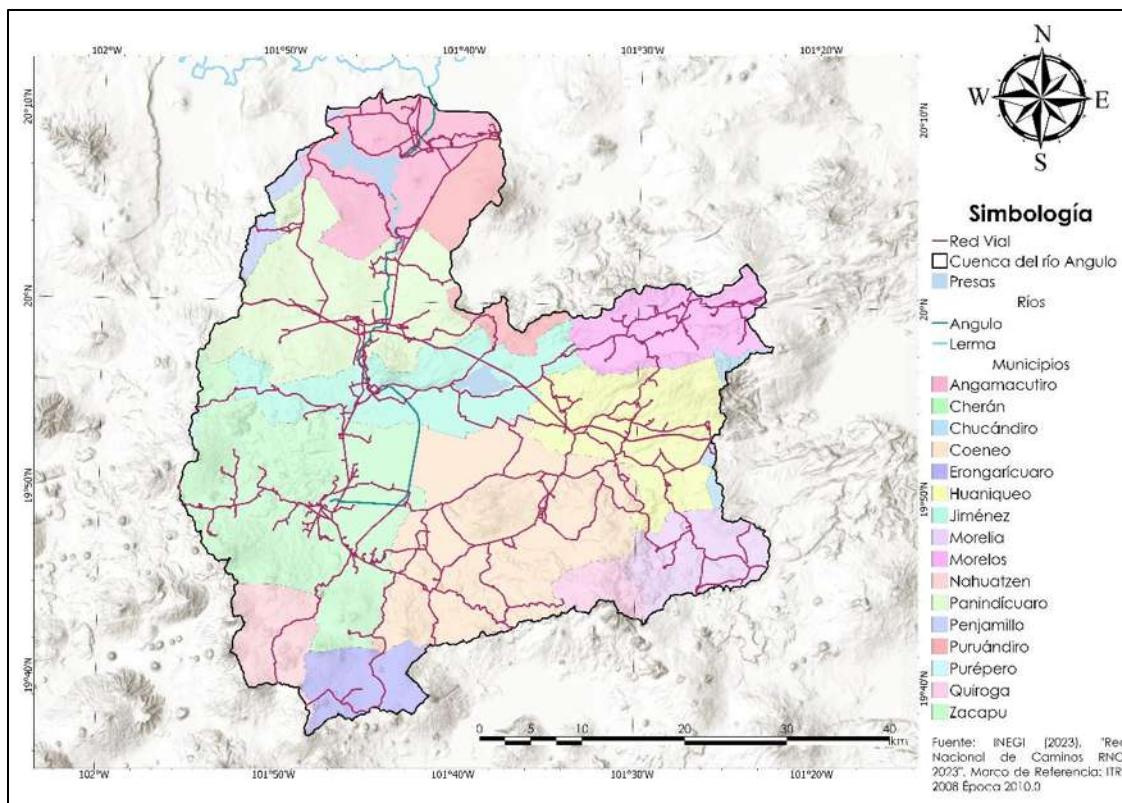


Figura 51. Red vial en la cuenca del río Angulo (INEGI, 2023b).

En la Tabla 18 se muestra la longitud de caminos por cada municipio, cabe aclarar que a los municipios que no cuentan con población dentro de la cuenca no se consideran la longitud de caminos, longitud que en su mayoría apenas alcanza 1km.

El municipio con mayor longitud de caminos es Zacapu, siendo también el municipio con mayor área dentro de la cuenca, mientras que el municipio con la menor longitud es Nahuatzen con 10.77 km.

Tabla 18. Longitud de caminos por municipio.

Municipio	Longitud de caminos (km)
Amangancutiro	99.15
Coeneo	163.99
Erongarícuaro	17.98
Huaniqueo	132.17
Jiménez	117.09
Morelia	41.54
Morelos	70.80
Nahuatzen	10.77
Panindícuaro	151.52
Puruándiro	20.95
Zacapu	171.85

Como con las otras vulnerabilidades, los indicadores se normalizan, para exemplificar se muestra la “Densidad de población”, teniendo como valor máximo 189.94 y como mínimo 14.92, para el municipio de Morelia tenemos una densidad de 43.55, en la ecuación [39] se muestra la operación para normalizar el indicador.

$$\frac{(43.55 - 14.92)}{(189.94 - 14.92)} \quad [39]$$

En Tabla 19 se muestran los valores de los valores normalizados.

Tabla 19. Normalización de indicadores económicos.

Municipio	Densidad de población (hab/km ²)	Población económicamente activa desocupada (%)	Longitud de caminos	Valor de la producción agrícola de riego y temporal
Amangancutiro	0.352	0.27	0.45	0.90
Coeneo	0.228	0.48	0.05	0.28
Erongarícuaro	0	0.07	0.96	0.00
Huaniqueo	0.147	1	0.25	0.17
Jiménez	0.295	0.60	0.34	0.39
Morelia	0.164	0	0.81	0
Morelos	0.176	0.13	0.63	0.08
Nahuatzen	0.033	0.67	1	0.00
Panindícuaro	0.217	0.29	0.13	1
Puruándiro	0.346	0.68	0.94	0.10
Zacapu	1	0.57	0	0.51

Continuación Tabla 19.

Municipio	Valor de la producción del ganado en pie	Grado de explotación de las cuencas	Grado de explotación de los acuíferos
Amangancutiro	0.41	1	1
Coeneo	0.92	0	0
Erongarícuaro	0.01	0	0
Huaniqueo	0.47	0	0
Jiménez	0.87	0	0.5
Morelia	0	0	0
Morelos	0.36	0	0
Nahuatzen	0.01	0	0
Panindícuaro	0.61	0	1
Puruándiro	0.07	1	1
Zacapu	1	0	0

Para la ponderación, se muestra el proceso usando la “Densidad de población”, la desviación estándar es de 0.26, el inverso de la desviación estándar es de 3.74, la suma de los inversos de las desviaciones estándar es de 19.67, en la ecuación [40] se muestra la ecuación de la ponderación.

$$\frac{1}{(0.26 * 19.67)}$$

[40]

En la Tabla 20 se muestran las ponderaciones de los indicadores con los que se obtienen la vulnerabilidad económica.

Tabla 20. Ponderación indicadores económicos.

	Ponderación
Densidad de población	0.19
Población económicamente activa desocupada	0.17
Longitud de caminos	0.13
Valor de la producción agrícola de riego y temporal	0.14
Valor de la producción del ganado en pie	0.13
Grado de explotación de las cuencas	0.13
Grado de explotación de los acuíferos	0.11

La Figura 52 muestra la vulnerabilidad económica de la cuenca. Nuevamente se puede ver un cambio de vulnerabilidad de acuerdo con el acuífero y la cuenca, resultando como área más vulnerable la porción norte del municipio de Angamacutiro con un 60 %. Los municipios del suroeste y sureste son los menos vulnerables. Los municipios de Huaniqeo y Coeneo presentan puntos de mayor vulnerabilidad con respecto al resto del área, esto se debe a la población económicamente activa desocupada; sin embargo, en el resto de los municipios no destacan localidades en particular como en las otras vulnerabilidades, esto debido a la escala de la información.

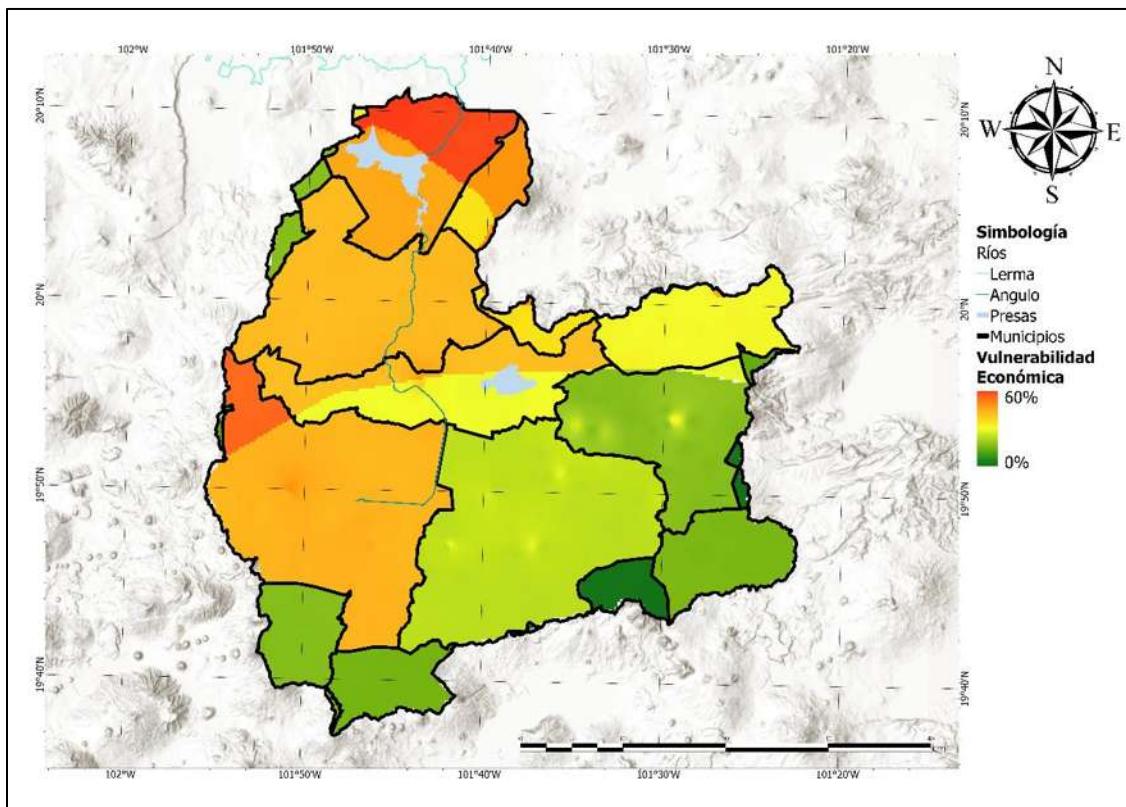


Figura 52. Vulnerabilidad económica en la cuenca del río Angulo.

10.4.4 Vulnerabilidad global

La forma en que se calculó la vulnerabilidad global fue haciendo un promedio de la vulnerabilidad ambiental, social y económica, este resultado se puede ver en la Figura 53.

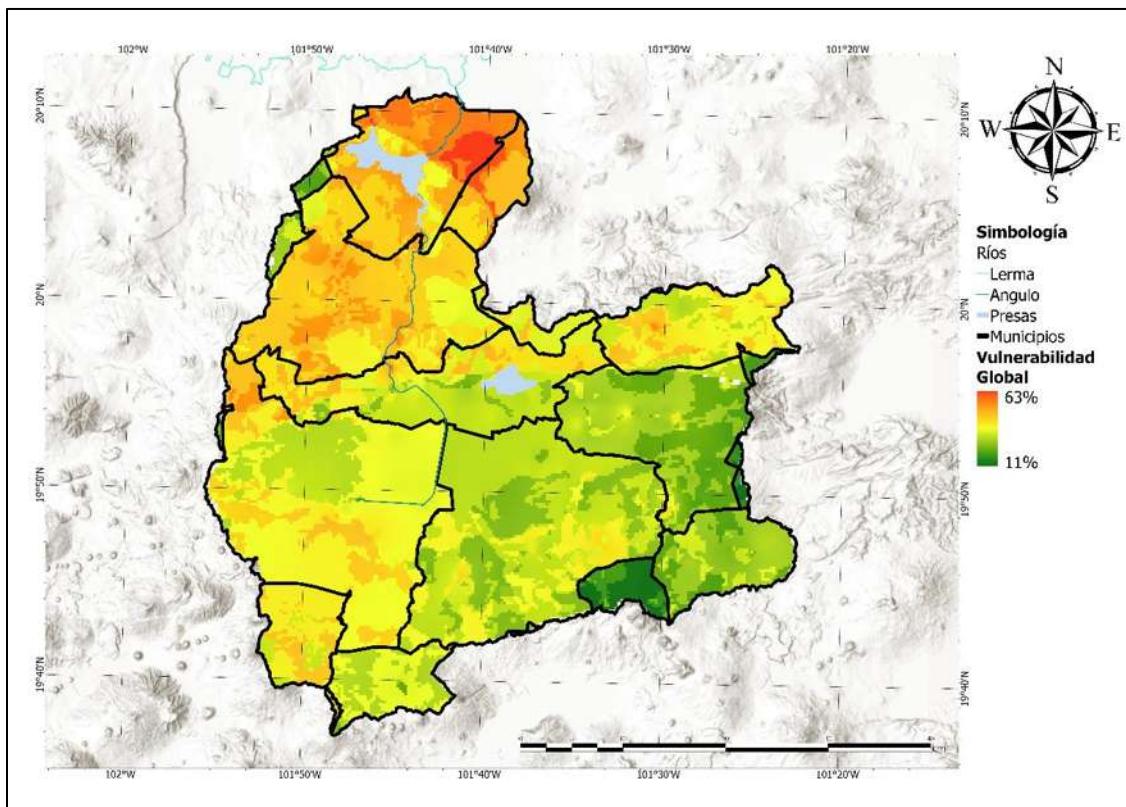


Figura 53. Vulnerabilidad global en la cuenca del río Angulo.

La zona más vulnerable de la cuenca es la parte norte, en el municipio de Angamacutiro, esto se debe a que el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad y la cuenca Lerma 5 están más explotados que el acuífero Zacapu y la cuenca del río Angulo, así mismo esta zona presenta mayor vulnerabilidad ambiental y económica, por lo cual esta zona se muestra más vulnerable globalmente en comparación con el resto de la cuenca. Los municipios menos vulnerables, sin considerar los municipios sin población, son Huaniqueo y Morelia, esto también se observa en los otros mapas de vulnerabilidad.

10.5 Riesgo

Se calculó el riesgo mediante la herramienta “calculadora raster”, indicando que el mapa de peligro (monitor de sequías) se debía multiplicar por el de vulnerabilidad; obteniendo así el riesgo ambiental, social, económico y global.

Debido a que la disparidad de las fechas entre la información de peligro y de vulnerabilidad, se supone que las mismas condiciones de sequías que se presentaron en el año 2017 se presentaron en el año 2023.

En la Figura 54 se muestra la simbología utilizada para el mapeo del riesgo, de la Figura 55 a la Figura 58 se muestran los mapas de riesgo ambiental, social, económico y global, respectivamente.

Valor	Categoría	Color
3	Alto	Rojo
2	Medio	Naranja
1	Leve	Amarillo
0	Bajo	Verde

Figura 54. Simbología utilizada para el mapeo del riesgo.

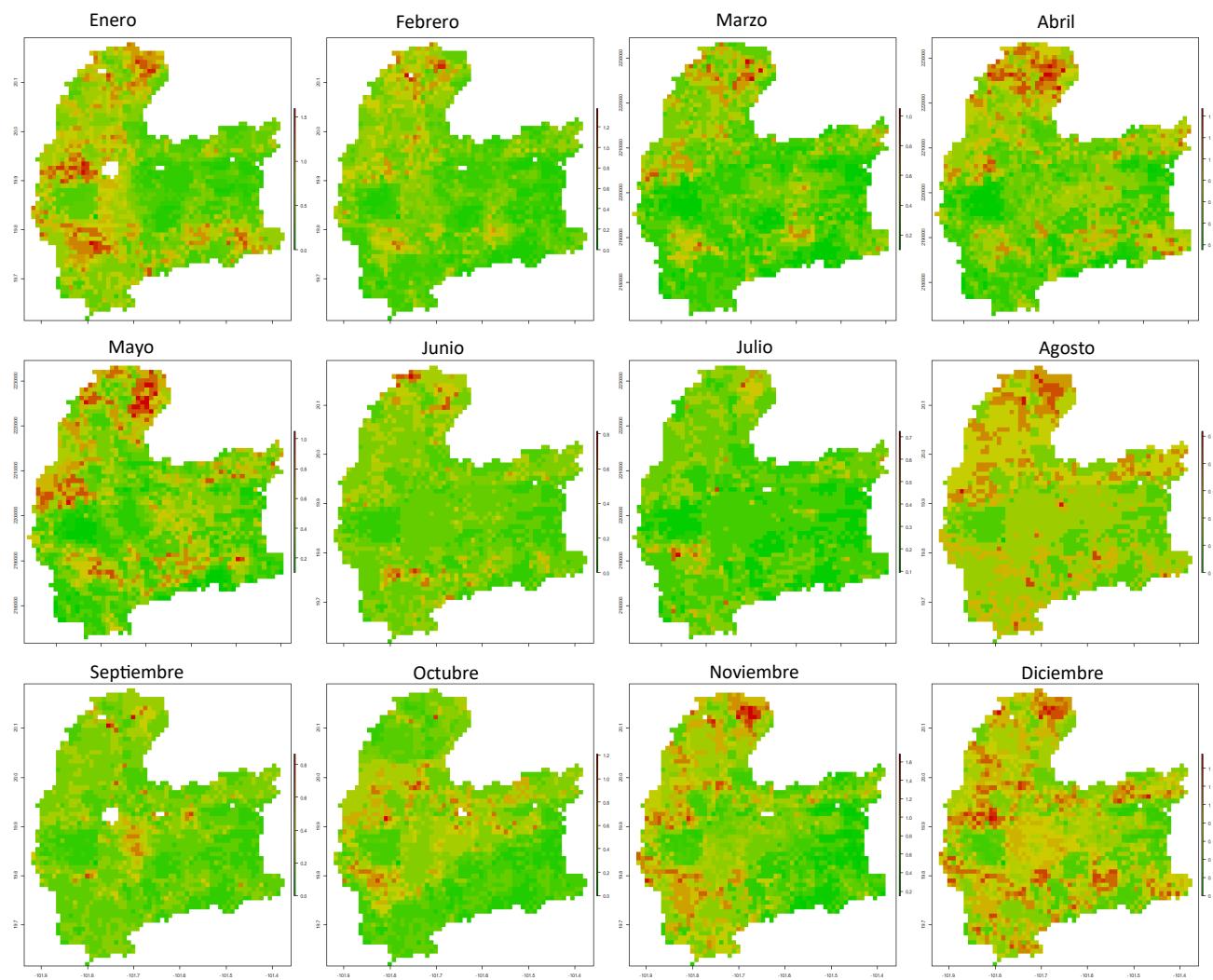


Figura 55. Riesgo ambiental supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.

Se observa una variabilidad en el riesgo ambiental con respecto al tiempo, la parte correspondiente al acuífero Pastor Ortiz y a la cuenca Lerma 5 es la que mayor riesgo ambiental presenta en la mayoría de los meses. También se observa que la zona sur de la cuenca suele tener menor riesgo ambiental que la mayor parte de la cuenca.

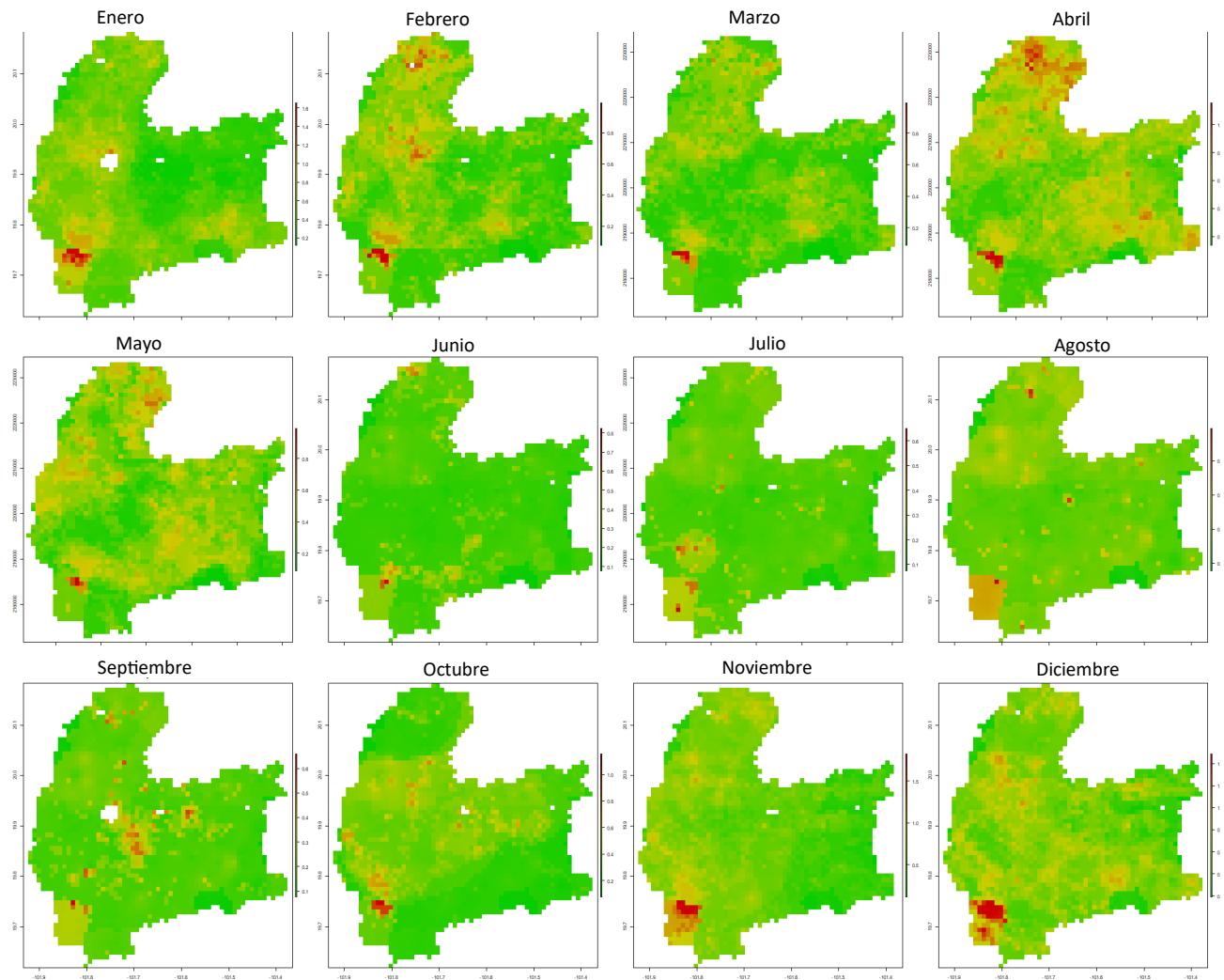


Figura 56. Riesgo social supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.

Lo que respecta al riesgo social, la porción perteneciente al municipio de Nahuatzen es la que mayor riesgo social presenta; sin embargo, la mayor parte del año no se presenta un gran riesgo social en toda la cuenca.

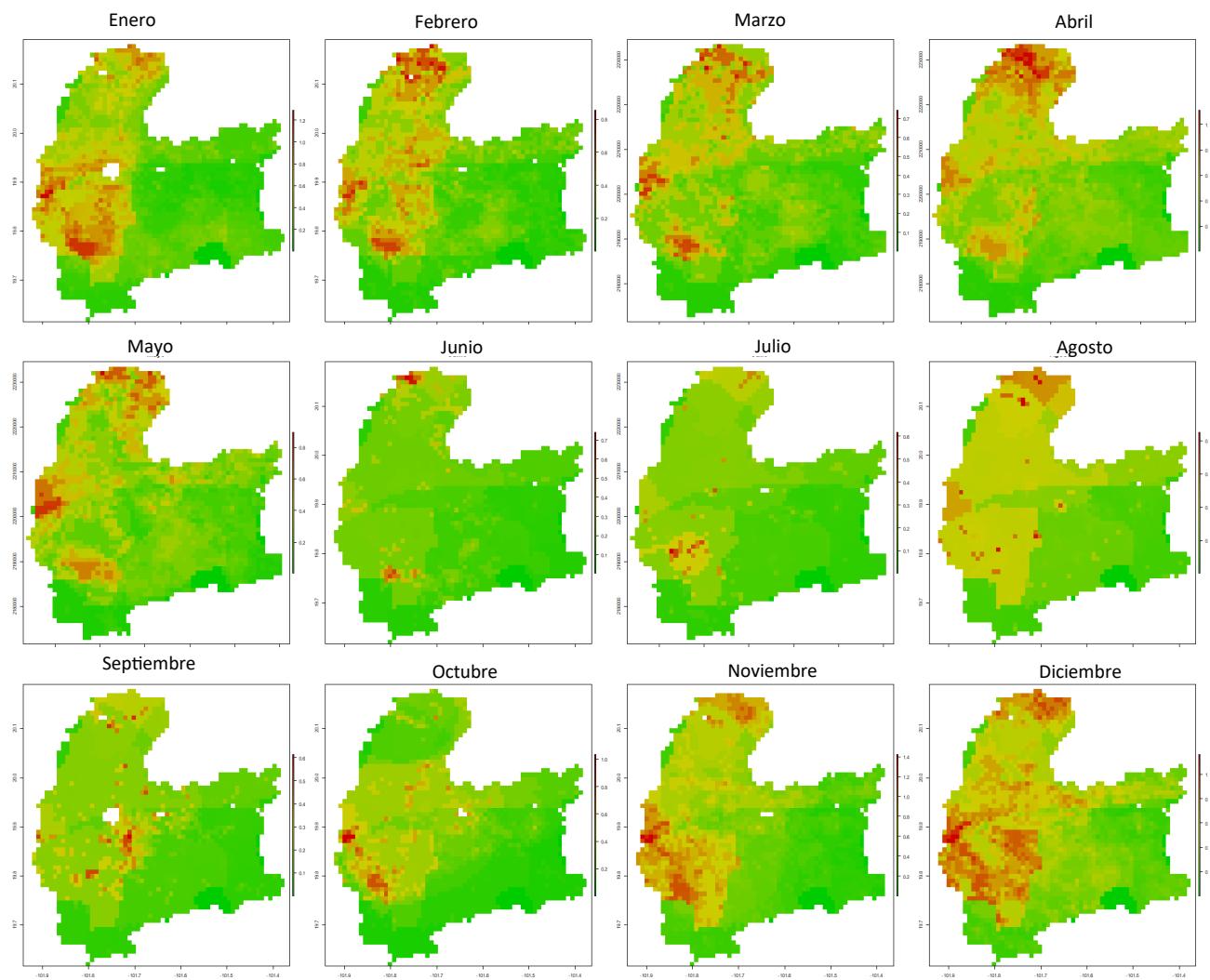


Figura 57. Riesgo económico supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.

En cuanto al riesgo económico es más notorio que la parte norte de la cuenca es la que mayor riesgo presenta, así como la parte oriental de la misma, mientras que la parte sur es la que menor riesgo económico presenta a lo largo del año.

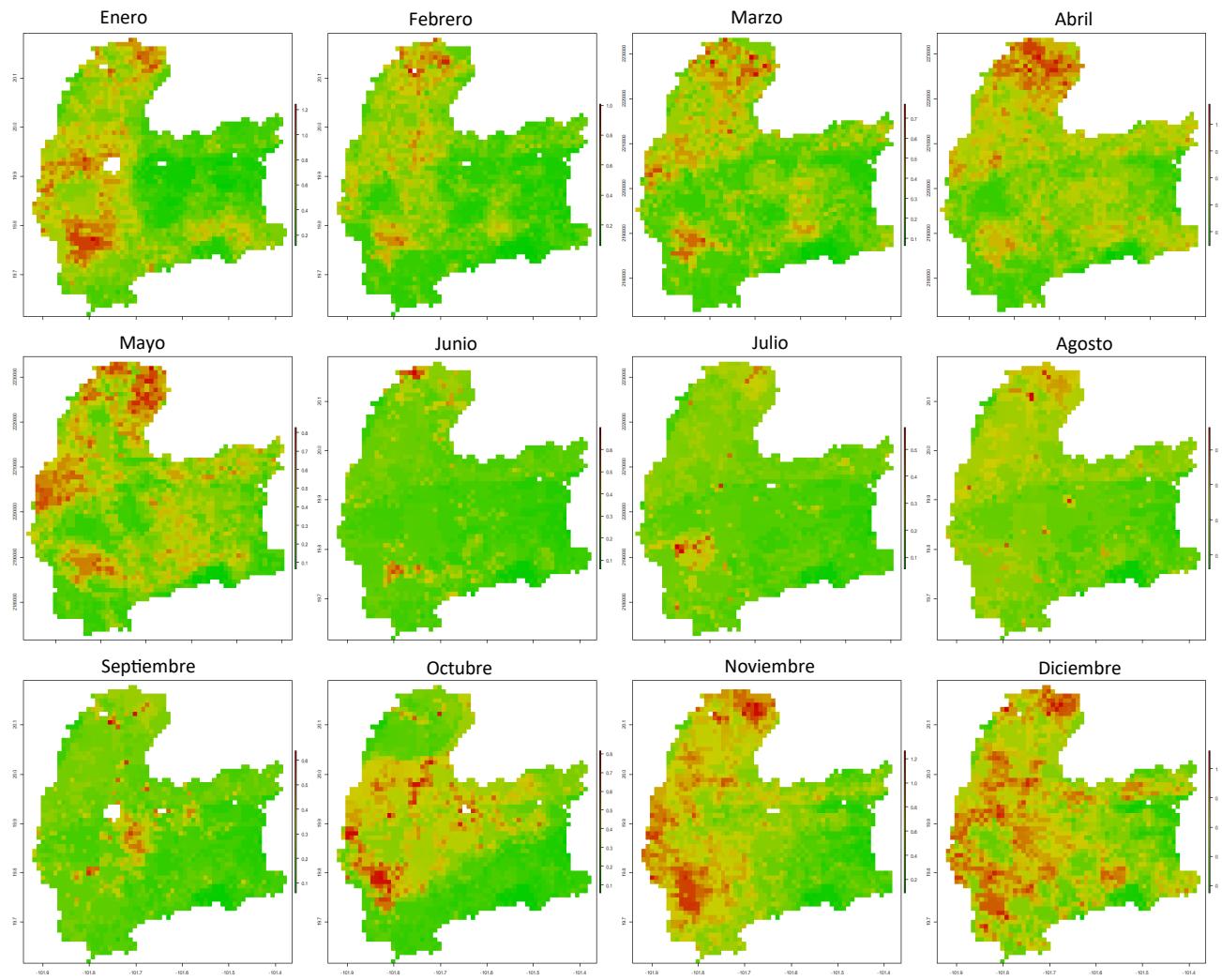


Figura 58. Riesgo global supuesto al año 2023 en la cuenca del río Angulo.

En términos generales se puede apreciar que la parte norte es la que mayor riesgo presenta, así como en ocasiones también la parte oriental; sin embargo, en diciembre se puede ver como el riesgo va en aumento por toda la cuenca.

11 Conclusiones

Espacial y temporalmente ha existido un cambio en el comportamiento de las sequías, presentándose períodos prolongados en algunas estaciones meteorológicas mientras que en otras estaciones no existen condiciones de sequías, este es uno de los problemas que existe con los índices *in-situ*, ya que ofrecen información muy puntual que no representa a toda la zona de interés.

Para solucionar esto recurrimos a los índices que se obtienen a partir de información satelital, ya que estos cubren una mayor área y es fácil de contrastar con la información meteorológica que existe. Estos índices nos proporcionan información de la salud vegetal que nos indica como han afectado las sequías a la flora del lugar en el mes en estudio, por lo que las condiciones meteorológicas del mes no representan las condiciones de la flora en ese momento, sino que tendrá repercusiones a futuro; sin embargo, las condiciones actuales de la flora puede repercutir en la salud vegetal a futuro por lo que es necesario también monitorearla, sobre todo porque en la cuenca se encuentran dos módulos de riego que se ven afectados por esto.

Al igual que las sequías, el peligro también cambia de manera espacio-temporal, ya que no se presenta de la misma manera a lo largo de la cuenca y el tiempo, por lo que es importante mantener actualizada la información para conocer el peligro ante sequías que se puede presentar en la zona.

Durante la recopilación de información de vulnerabilidad, se encontró con el problema de la falta de esta, incluso se recurrió a la plataforma de transparencia, donde algunas dependencias no respondieron a la solicitud de información, por lo que los cálculos no se pudieron hacer como estaban propuestos por la CONAGUA.

Se intentó hacer un cálculo por localidad para tener mayor fineza en los resultados; sin embargo no todos los indicadores se presentan de manera local, algunos se presentan de manera municipal, los cuales todavía se pueden utilizar para realizar el análisis de vulnerabilidad, en cambio hay ciertos indicadores que únicamente se presentan de manera estatal, información que no es útil para este trabajo, ya que es una escala más pequeña en comparación a la propuesta por la CONAGUA, que hace el análisis para todos los municipios del país, donde estos indicadores estatales si pueden ser útiles.

De los resultados de las vulnerabilidades social, ambiental, económica y global, podemos destacar que es marcado como cambia la vulnerabilidad de acuerdo con el acuífero y la cuenca, siendo más vulnerables la zona del Lerma 5, estando también en el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad, siendo la cuenca y acuífero más explotados correspondientemente.

La decisión hacer el análisis por localidad da información más fina por la dimensión de la zona, identificando puntos más vulnerables que no se hubieran podido detectar si se hubieran tomado datos únicamente municipales.

Así como la sequía, el riesgo también es variable en el tiempo, y dependiendo del tipo de riesgo que se analice el resultado va a ser diferente; sin embargo, si es consistente con los resultados obtenidos por el monitor de sequías y los resultados de vulnerabilidad.

Los resultados están desactualizados debido a la falta de información meteorológica, así como también varios de los insumos utilizados para la vulnerabilidad, sin embargo, los resultados obtenidos se pueden contrastar con un registro histórico con el que se puede validar la información obtenida.

12 Líneas futuras de investigación

Como líneas futuras de investigación se muestran aspectos que resultan potencialmente interesantes para desarrollar.

- Debido a la falta de información meteorológica se puede trabajar un monitor de sequías únicamente con información satelital, así como agregar otros índices de sequías.
- Realizar una modelación hidrológica para determinar las sequías hidrológicas, comparándola con la información de los índices de sequía hidrológica.
- Con la información de este trabajo se podría hacer un análisis de prevención de riesgo antes sequías, enfocado en la parte agrícola.
- Se pueden realizar pronósticos climáticos de sequías como parte complementaria al punto anterior.
- Analizar las sequías de forma estacional, enfocándose a los patrones que podrían presentarse.

13 Referencias

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452–480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2018). Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960–2100. *Science of the Total Environment*, 644, 520–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.023>
- Alatorre, A. (2010, marzo 5). Advierte Conagua desabasto por sequía. *El Mañana*.
- Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., & Kustas, W. P. (2011). Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. *Journal of Climate*, 24(8), 2025–2044. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3812.1>
- Anderson, R. L. (1942). Distribution of the Serial Correlation Coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics*, 13(1), 1–13.
- Andrade-Servín, A. G., & Israde-Alcántara, I. (2021). Riqueza y distribución de las diatomeas epilíticas indicadoras de contaminación en el río Angulo afluente del río Lerma, México. *Hidrobiológica*, 30(3), 43–52. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/Andrade>
- Arboit, M. E., & Maglione, D. S. (2018). Boletín de Estudios Geográficos N^a 109-2018-ISSN 0374-6186 Boletín de Estudios Geográficos n (Vol. 109).
- Ashok, K. R., & Sasikala, C. (2012). Farmers' vulnerability to rainfall variability and technology adoption in rain-fed tank irrigated agriculture. *Agricultural Economics Research Review*, 25(2), 267–278.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina.
- Cao, L.-J., & Yan, Z.-W. (2012). Progress in Research on Homogenization of Climate Data. *Advances in Climate Change Research*, 3(2), 59–67. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2012.00059>
- Cardona, O.-D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., Sinh, B. T., Décamps, H., Keim,

- M., Davis, I., Ebi, K. L., Lavell, A., Mechler, R., Murray, V., Pelling, M., Pohl, J., Smith, A.-O., & Thomalla, F. (2012). Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability. En *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 65–108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005>
- Carrão, H., Naumann, G., & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change*, 39, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012>
- Cherlinka, V. (2020, septiembre 28). NDVI: Preguntas Frecuentes Y Qué Necesita Saber. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/#:~:text=¿Cómo%20Se%20Calcula%20El%20NDVI,Rojo%20es%20luz%20roja%20visible>.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial* (Railp SA España).
- Colotti, E., Cedeño, M., & Montañez, C. (2013). La sequía meteorológica y la variación de la superficie agrícola en la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela período 1972-2004. En *Terra* (Vol. 29, Número 45). Universidad Central de Venezuela. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000100002&lng=es&nrm=iso&tlang=es
- Comisión Intersecretarial de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados(CIBIOGEM). (s/f). Áreas Naturales Protegidas (ANP) de competencia Local, Áreas naturales protegidas del estado de Michoacán. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). *Información Incendios Forestales 2015-2023*.
- CONAGUA. (2007). *Informe Final: Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Concepción-Epitacio Huerta, Zácapa, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz en el estado de Michoacán: Zácapa*.
- CONAGUA. (2014). *Política Pública Nacional para la Sequía, Documento Rector.*

CONAGUA. (2022). *Mapas de Vulnerabilidad a la sequía a nivel municipal.* (2020) noviembre de 2022 PROGRAMA NACIONAL CONTRA LA SEQUÍA (PRONACOSE).

CONAGUA. (2023a). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

CONAGUA. (2023b). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos.

CONAGUA. (2023c). Información Estadística Climatológica . En Sistema Meteorológico Nacional.

Cruz Gutiérrez, F. V., Magaña Zamora, J. D., & Lambarri Beléndez, J. (2017). Proyecto “Valoración Económica del Agua para su uso Eficiente en la Agricultura e Industria” DP1716.1.

Dabanli, I. (2018). Drought hazard, vulnerability, and risk assessment in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3867-x>

Di Lena, B., Vergni, L., Antenucci, F., Todisco, F., & Mannocchi, F. (2014). Analysis of drought in the region of Abruzzo (Central Italy) by the Standardized Precipitation Index. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2), 41–52. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0876-2>

Didan, K. (2021). MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>

DOF. (2000). DECLARATORIA de Desastre Natural para efectos de las Reglas de Operación del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), provocada por la sequía prolongada y atípica en el Estado de Michoacán y que afectó infraestructura pública hidráulica y el abasto de agua potable en la entidad, así como para la generación de fuentes transitorias de ingreso para la población de bajos ingresos.

DOF. (2012). Acuerdo para que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas.

- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Ciencias del Agua*, VII(5), 77–93.
- Doorembos, J. (1976). *Agro-meteorological field stations*.
- Dow, K. (2010). News coverage of drought impacts and vulnerability in the US Carolinas, 1998–2007. *Natural Hazards*, 54(2), 497–518. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9482-0>
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson, E. G. (1980). On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research*, 16(2), 289–296. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00289>
- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México* (2a ed.). Consejo Nacional para Cultura y las Artes.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, E. (1998). *Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Gonzaga Aguilar, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30–41.
- Guha-Sapir, D. (2017). EM-DAT: the emergency events database. <http://emdat.be/emdat db/>.
- Hao, C., Zhang, J., & Yao, F. (2015). Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35, 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011>
- Hao, L., Zhang, X., & Liu, S. (2012). Risk assessment to China's agricultural drought disaster in county unit. *Natural Hazards*, 61(2), 785–801. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0066-4>

- He, B., Lü, A., Wu, J., Zhao, L., & Liu, M. (2011). Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China. *Journal of Geographical Sciences*, 21(2), 235–249. <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0841-x>
- Heydari Alamdarloo, E., Khosravi, H., Nasabpour, S., & Gholami, A. (2020). Assessment of drought hazard, vulnerability and risk in Iran using GIS techniques. *Journal of Arid Land*, 12(6), 984–1000. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0096-4>
- INEGI. (2013). Conjunto de Datos de Erosión del Suelo. Escala 1:250000. Serie I.
- INEGI. (2018). División política municipal, 1:250000.
- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020.
- INEGI. (2021). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250000, Serie VII, Conjunto Nacional.
- INEGI. (2022). Censo Agropecuario 2022.
- INEGI. (2023a). Continuo de elevaciones y modelos digitales de elevación.
- INEGI. (2023b). Red Nacional de Caminos RNC. 2023. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. (2007). *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* .
- Iyengar, N. S., & Sudarshan, P. (1982). A Method of Classifying Regions from Multivariate Data. *Economic and Political Weekly*, 17(51), 2048–2052.
- Jayanthi, H., Husak, G. J., Funk, C., Magadzire, T., Chavula, A., & Verdin, J. P. (2013). Modeling rain-fed maize vulnerability to droughts using the standardized precipitation index from satellite estimated rainfall—Southern Malawi case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 4, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2013.02.001>

- Jiao, W., Tian, C., Chang, Q., Novick, K. A., & Wang, L. (2019). A new multi-sensor integrated index for drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.008>
- Jonkman, S. N., van Gelder, P. H. A. J. M., & Vrijling, J. K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, 99(1), 1–30. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00283-2)
- Kogan, F. N. (1995a). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F. N. (1995b). Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655–668. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621–636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Leichenko, R. M., & O'Brien, K. L. (2002). The Dynamics of Rural Vulnerability to Global Change: The Case of southern Africa. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.1023/A:1015860421954>
- Liu, Y., & Chen, J. (2021). Future global socioeconomic risk to droughts based on estimates of hazard, exposure, and vulnerability in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142159>
- Lobato Sánchez, R., Altamirano-del-Carmen, M. Á., Hoyos-Reyes, C., López-Pérez, M., Salas-Salinas, M. A., & Rosario-de-la-Cruz, J. G. (2019). Procedimiento metodológico para la elaboración de un monitor de la persistencia de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 146–176. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-06>
- Lu, X., Wang, L., Pan, M., Kaseke, K. F., & Li, B. (2016). A multi-scale analysis of Namibian rainfall over the recent decade – comparing TMPA satellite estimates and ground observations. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.07.003>

- Madrigal Barrera, J. J., Martínez Herrera, G., & Sánchez Quispe, S. T. (2015). *Modelo de gestión hídrica de la cuenca del río Angulo, para uso conjunto: superficial y subterráneo*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martínez, P. E., Martínez, P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Mundi-Prensa.
- Mather, J. R. (1975). Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques. *Climatology*, XXVIII(2).
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Eighth Conference on Applied Climatology*.
- Méndez, M. (2013). *Diagnóstico y Pronóstico de Sequía en México. Análisis de los Índices y Definiciones de Sequía Aplicados en México y una Revisión del Estado del Arte sobre los Métodos para su Pronóstico*.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010a). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010b). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Nasrollahi, M., Khosravi, H., Moghaddamnia, A., Malekian, A., & Shahid, S. (2018). Assessment of drought risk index using drought hazard and vulnerability indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(20), 606. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3971-y>
- Nations Office for Disaster Risk Reduction, U. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030*.
- Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Preguntas frecuentes sobre el monitoreo por satélite de la FAO (GIEWS)*. <https://www.fao.org/giews/earthobservation/faq.jsp?lang=es>
- Ortega-Gaucin, D., Bartolón, J. de la C., & Bahena, H. V. C. (2018). Drought vulnerability indices in Mexico. *Water (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111671>

- Ortega-Gaucin, D., de la Cruz Bartolón, J., & Castellano Bahena, H. V. (2018). *Peligro, Vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto de cambio climático en México*. 79–103.
- Ortega-Gaucin, D., Ordoñez, A., Rojas, O., Hernández, T., & De La Cruz, J. (2019). *Monitoreo y alerta temprana de sequía en la agricultura: Evaluación del Sistema del Índice de Estrés Agrícola (ASIS-País) de la FAO*. www.riego.mx
- Orville, H. D. (1990). AMS statement on meteorological drought. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(7), 1021–1023.
- Peduzzi, P., Dao, H., & Herold, C. (2002). *Global Risk And Vulnerability Index Trends per Year (GRAVITY) Phase II: Development, analysis and results From The “GRAVITY-Team” United Nations Environment Programme Global Resource Information Database-Geneva (UNEP/DEWA/GRID-Geneva) For United Nations Development Programme Bureau of Crisis Prevention & Recovery UNDP/BCPR (formerly ERD)*.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Natural Hazards and Earth System Sciences Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. En *Hazards Earth Syst. Sci* (Vol. 9). www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1149/2009/
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones* (C. Pérez Gutiérrez & Á. L. Muñoz Nieto, Eds.). Universidad de Salamanca.
- Popova, Z., Ivanova, M., Martins, D., Pereira, L. S., Doneva, K., Alexandrov, V., & Kercheva, M. (2014). Vulnerability of Bulgarian agriculture to drought and climate variability with focus on rainfed maize systems. *Natural Hazards*, 74(2), 865–886. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1215-3>
- Rhee, J., & Im, J. (2017). Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 105–122. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.011>
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2875–2887. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>

- Rojas, O. (2016). *Protocolo para el Proceso de Calibración y Adaptación Nacional de la Herramienta ASIS-País* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. www.fao.org/publications
- Rojas, O., Vrieling, A., & Rembold, F. (2011). Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 343–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.006>
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., & Giakoumakis, S. (1992). On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*, 6(4), 249–277. <https://doi.org/10.1007/BF00872280>
- Ruiz, V. (2023, abril 10). Prevé Conagua grave crisis de sequía para Michoacán en 2024. *El Sol de Morelia*. <https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/preve-conagua-grave-crisis-de-sequia-para-michoacan-en-2024-9895360.html>
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., & Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications.
- Sánchez-Mora, E. (1980). Las sequías en el México antiguo. En E. Florescano (Ed.), *Análisis histórico de las sequías en México* (pp. 75–76).
- Sánchez-Quispe, S. T., Navarro-Farfán, M. del M., & García-Romero, L. (2021). Methodology for processing meteorological and hydrometric data at basin level. En O. Vargas-Delgado (Ed.), *Handbook T-XVI CIERMME Women in Science Engineering and Technology: Vol. XVI* (pp. 107–145). ECORFAN. <https://doi.org/10.35429/H.2021.16.107.145>
- Sancho y Cervera, J., Marengo-Mogollón, H., Escalante-Mar, F., & Padilla-Ríos, G. (1977). *Evaluación de la sequía de 1977*.
- Santos, M. J., Veríssimo, R., Fernandes, S., Orlando, M., & Rodrigues, R. (2000). *Overview of meteorological drought analysis on Western Europe*.
- SARH. (1981). *Plan Nacional Hidráulico 1981*.
- Siegel, S. (2015). *Estadística No Paramétrica* (4a ed.). Trillas.
- Skakun, S., Kussul, N., Shelestov, A., & Kussul, O. (2014). Flood Hazard and Flood Risk Assessment Using a Time Series of Satellite Images: A Case Study in Namibia. *Risk Analysis*, 34(8), 1521–1537. <https://doi.org/10.1111/risa.12156>

SMN. (2023). Monitor de Sequías en México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

SMN. (2024). Monitor de Sequía de México.

Speranza, F., & Zerda, H. R. (2002). Potencialidad de los índices de vegetación de coberturas forestales.

Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). THE DROUGHT MONITOR. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1181–1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>

Thom, H. C. S. (1966). *Some methods of climatological analysis*. Geneva: W.M.O.

Tonini, F., Jona Lasinio, G., & Hochmair, H. H. (2012). Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 564–572. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.018>

Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>

Trnka, M., Hlavinka, P., Možný, M., Semerádová, D., Štěpánek, P., Balek, J., Bartošová, L., Zahradníček, P., Bláhová, M., Skalák, P., Farda, A., Hayes, M., Svoboda, M., Wagner, W., Eitzinger, J., Fischer, M., & Žalud, Z. (2020). Czech Drought Monitor System for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *International Journal of Climatology*, 40(14), 5941–5958. <https://doi.org/10.1002/joc.6557>

Tsakiris, G., Loukas, A., Pangalou, D., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., & Cancelliere, A. (2007). Options Méditerranéennes. En *Drought characterization* (pp. 85–102).

Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>

Unganai, L. S., & Kogan, F. N. (1998). Drought Monitoring and Corn Yield Estimation in Southern Africa from AVHRR Data. *Remote Sensing of*

Environment, 63(3), 219–232. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00132-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00132-6)

UN-SPIDER. (s/f-a). Google Earth Engine VHI Script v2. Recuperado el 9 de abril de 2025, de https://un-spider.org/sites/default/files/gee_vhi_script_v2.txt

UN-SPIDER. (s/f-b). Recommended Practice: Drought monitoring – SPI (Step-by-step). Recuperado el 13 de abril de 2025, de <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-drought-monitoring-spi/step-by-step>

Vargas, J., & Paneque, P. (2021). Metodología para el cálculo del índice de vulnerabilidad a la sequía (IVS). <https://doi.org/10.46661/rio.11699>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vincent, K. (2004). Creating an Index of Social Vulnerability to Climate Change in Africa. <https://www.researchgate.net/publication/228809913>

Wan, Z. (2021). MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.061>

Wang, L., D'Odorico, P., Evans, J. P., Eldridge, D. J., McCabe, M. F., Caylor, K. K., & King, E. G. (2012). Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2585–2603. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2585-2012>

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (1994). *At risk: natural hazards, peoples vulnerability and disasters* (2nd edn).

WMO. (1966). *Climate change* (No. 79).

Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, 25(4), 505–520. <https://doi.org/10.1002/joc.1142>

Wu, J., Zhou, L., Liu, M., Zhang, J., Leng, S., & Diao, C. (2013). Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. *International Journal of*

Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 397–410.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.11.003>

Wu, Z., Mao, Y., Li, X., Lu, G., Lin, Q., & Xu, H. (2016). Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3), 1033–1044. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1080-y>

Xu, P., Zhou, T., Zhao, X., Luo, H., Gao, S., Li, Z., & Cao, L. (2018). Diverse responses of different structured forest to drought in Southwest China through remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.009>

Yu, X., He, X., Zheng, H., Guo, R., Ren, Z., Zhang, D., & Lin, J. (2014). Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China. *Natural Hazards*, 71(1), 275–289. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0909-2>

Zhang, A., & Jia, G. (2013). Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>

Zhang, Q., & Zhang, J. (2016). Drought hazard assessment in typical corn cultivated areas of China at present and potential climate change. *Natural Hazards*, 81(2), 1323–1331. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2137-4>

Anexos

a) Código para el cálculo del SPI y SPEI

Con la finalidad de calcular el SPI y el SPEI, se elaboró un código en R. En el cual se determina la magnitud y duración de los períodos secos como de los húmedos.

Se presenta a continuación el código para el cálculo del SPI:

```
1 #Librerias
2 require(pacman)
3 pacman::p_load(SPEI, readxl, openxlsx, ggplot2, lattice, paletteer, dplyr,
4 tidyverse, xts)
5
6 #Lectura de Datos
7 setwd("C:/Users/krito/Desktop/Sequías en R")
8 files.list <- list.files(recursive = T, pattern = "*\\*.xlsx")
9
10 for (j in 1:length(files.list)) {
11   setwd("C:/Users/krito/Desktop/Sequías en R")
12   files.list <- list.files(recursive = T, pattern = "*\\*.xlsx")
13
14 Est <- read_excel(files.list[j], sheet = 1)
15 hoja <- gsub(".xlsx", "", files.list [j])
16 Est$prcp[Est$prcp==0] <- 0.00001
17
18 #Determinación de SPI
19 spi1 <- spi(Est$prcp, 1, distribution = "Gamma")
20 spi1a <- as.data.frame(spi1$fitted)
21
22 spi_data <- data.frame(SPI = spi1$fitted)
23 spi1a <- as.numeric(spi1$fitted) #-Inf
24
25 #Duración de la sequía
26 #Generando serie de Tiempo y Data Frame
27 fecha1 <- Est[, 1]
28 fecha1 <- as.data.frame(fecha1)
29 start_date <- as.Date (fecha1[1 ,1])
30 n <- nrow(Est[, 1])
31 end_date <- as.Date(fecha1[n, ])
32 month1 <- function(x) as.Date(cut(x, "month"))
33
```

```

34 months <- seq(month1(start_date), month1(end_date), "month")
35 result <- data.frame(start = pmax(start_date, months),
36 end = pmin(end_date, month1(months + 31) - 1),
37 month = format(months, "%B"),
38 year = as.numeric(format(months, "%Y")),
39 stringsAsFactors = FALSE)
40 Date <- as.data.frame(months)
41
42 #Función de Conteo Acumulado
43 cons_spia <- function(x){
44 n <- length(x)
45 if(n < 2) x
46 out <- integer(n)
47 y <- rle(x)
48 cur_pos <- 1
49 for (i in seq_len(length(y$lengths))) {
50 out[(cur_pos):(cur_pos + y$lengths[i]- 1)] <- cumsum(rep(y$value[i],
51 y$lengths[i]))
52 cur_pos <- cur_pos + y$lengths[i]
53 }
54 out
55 }
56
57 #Acumulación de periodos
58 Date$SPI <- spi1a
59
60 Count <- Date %>%
61 mutate(acum = cons_spia(sign(c(SPI)))) %>%
62 arrange(months)
63
64
65 #Determinación de la duración
66 #wbd <- createWorkbook()
67 Acum <- as.data.frame.Date(Count$acum)
68 Acum[is.na(Acum)] = 0
69 n <- length(Count$acum)
70 out <- integer(n)
71 if (abs(Acum[1, 1]) == abs(Acum[2, 1])) {
72 out[1] <- Acum[1, 1]
73 } else (out[1] <- NA)
74 for (k in 2:(n-1)) {
75 if(Acum[k, 1] > Acum[k-1, 1] & Acum[k, 1] > Acum[k+1, 1]){
76 out[k] <- Acum[k, 1]

```

```

77 } else if (Acum[k, 1] < Acum[k-1, 1] & Acum[k, 1] < Acum[k+1, 1]){
78 out [k] <- Acum[k, 1]
79 }else (out[k] <- NA)
80 }
81 Count$Dur <- out
82
83 #Determinación de la Magnitud
84 Mag <- as.data.frame(Count$SPI)
85 Mag[is.na(Mag)] = 0
86 n <- length(Count$acum)
87 out2 <- integer(n)
88
89 if (Mag[1, 1] > 0 & Mag[2, 1] > 0 ){
90 out2[1] <- (out2[1] <- NA)
91 } else if (Mag[1, 1] < 0 & Mag[2, 1] < 0){
92 out2[1] <- (out2[1] <- NA)
93 } else out2[1] <- Mag[1, 1]
94
95 for (k in 2:(n - 1)) {
96 if(Mag[k, 1] > 0 & Mag[k-1, 1] > 0){
97 out2[k] <- Mag[k, 1] + out2[k-1]
98 } else if (Mag[k, 1] < 0 & Mag [k-1, 1] < 0){
99 out2[k] <- Mag[k, 1] + out2[k-1]
100 } else (out2[k] <- Mag[k, 1])
101 }
102
103 Count$Mag <- out2
104 ww <- Count
105 nombre_archivo <- paste("SPI_", hoja,".xlsx", sep = "")
106 setwd("C:/Users/krito/Desktop/Sequías en R/Resultados")
107 write.xlsx(ww, nombre_archivo)
108
109 #Generación de Gráficos de Severidad y Magnitud
110 setwd("C:/Users/krito/Desktop/Sequías en R/Graficas")
111
112 star <- as.numeric(substr(start_date, 1, 4))
113 end <- as.numeric(substr(end_date, 1, 4))
114 años_l <- (end - star)
115 prueba <- ts(rep(NA, (años_l*12)), start = c(substr(start_date, 1, 4), 1), end =
as.numeric(substr(end_date, 1, 4)), frequency = 12)
116
117
118 dmn <- list(month.abb, unique(floor(time(prueba))))

```

```

119 yes <- as.data.frame(t(matrix(prueba, 12, dimnames = dmn)))
120 class(yes)
121
122 datos <- yes
123 df <- datos[, 1:length(datos)]
124 # rn <- datos[, 1]
125 # rownames(df) <- rn
126 x <- colnames(df[1:length(df)])
127 y <- (rownames(df[, 1:length(df)]))
128 startmes <- as.numeric(substr(start_date, 6, 7))
129 ene <- 1
130 endmes <- as.numeric(substr(end_date, 6, 7))
131 dic <- 12
132 a <- startmes - ene
133 b <- dic - endmes
134 aa <- rep(NA, times = a)
135 bb <- rep(NA, times = b)
136 z <- c(aa, Count[, 2], bb)
137 data <- expand.grid(X=x, Y=y)
138 data$Z <- z
139 n_hm <- paste0("SPI_", 1, "-", hoja)
140 myPanel <- function(x, y, z, ...){
141 panel.levelplot(x, y, z, ...)
142 panel.text(x, y, round(z, 1), fontsize = 2)}
143
144 plot.new()
145 my.at = c(-7, -2, -1.5, -1, 1, 1.5, 2, 5)
146 my.brks = seq(-5, 5, by = 1.3)
147 myColorkey <- list(at = my.brks, labels = list(at = my.brks, labels = my.at),
148 space = "bottom", y = 1)
149 plot(NA, xlim = c(-500, 500), ylim = c(0, 500))
150 jpeg(file = paste0("HM_SPI_", hoja, ".jpg"), width = 1500, height = 1000, units =
"px", res = 300, quality = 100)
151 #plot(NA, xlim = c(-500, 500), ylim = c(0, 100))
152 print(levelplot(Z ~ X*Y, data = data, xlab = "Meses", ylab = "Años", main = n_hm,
fontsize = 10, at = my.at,
153 col.regions = heat.colors(100), colorkey = myColorkey, margin = F,
panel = myPanel))
154 #text(c("Ex.Seco Sev.Seco Mod.Seco Normal Mod.Hum MuyHum EXHum"))
155
156 dev.off()
157
158 }

```

El código referente al cálculo del SPEI es muy similar al del SPI solo con una diferencia al principio del código, debido a que el SPEI necesita de datos de temperatura para el cálculo de la evapotranspiración, así como también se necesita de la latitud, debido al método de evapotranspiración que se seleccionó, esta parte del código se muestra a continuación:

```
#latitud
18 lat <- as.numeric(Est[1, 5])
19 # Calculo de la ETP
20 Est$ETP_har=hargreaves(Est[, 4], Est[, 3], lat=lat)
21
22 #Balance
23 Est$BAL <- Est[, 2] - Est[, 6]
24 bal <- as.matrix(Est[, 7])
25spei1 <- spei(bal, 3, distribution = 'log-Logistic')
```

b) Código para la determinación del peligro

Para calcular el peligro se realizó un código en R, en el cual se le da la asignación de peso y la calificación a cada uno de los valores de SPI. El código se presenta a continuación.

```
1 library(readxl)
2 library(openxlsx)
3
4 setwd("C:/Users/krito/Desktop/Angulo/nueva estacion")
5 files.list <- list.files(recursive = TRUE, pattern = "SP")
6
7 for (j in 1:length(files.list)) {
8   est <- read.xlsx(files.list[j], sheet = 1)
9   hoja <- gsub(".xlsx", "", files.list[j])
10  spi <- as.numeric(est[, 2])
11  n <- length(spi)
12  cdf <- pnorm(spi)
13  w <- c()
14  r <- c()
15  h <- c()
16  for (i in 1:n) {
17    if (spi[i] >= 0) {
18      w[i] <- 0
19    } else if (0 > spi[i] && spi[i] > -1) {
20      w[i] <- 1
21    } else if (-1 > spi[i] && spi[i] > -1.5) {
22      w[i] <- 2
23    } else if (-1.5 > spi[i] && spi[i] > -2) {
24      w[i] <- 3
25    } else {
26      w[i] <- 4
27    }
28
29    if (0.8 > cdf[i] && cdf[i] > 0.65) {
30      r[i] <- 1
31    } else if (0.65 > cdf[i] && cdf[i] > 0.5) {
32      r[i] <- 2
33    } else if (0.5 > cdf[i] && cdf[i] > 0.35) {
34      r[i] <- 3
35    } else if (0.35 > cdf[i] && cdf[i] > 0.2) {
36      r[i] <- 4
37    } else if (0.2 > cdf[i] && cdf[i] > 0.175) {
38      r[i] <- 1
```

```

39 } else if (0.175 > cdf[i] && cdf[i] > 0.15) {
40 r[i] <- 2
41 } else if (0.15 > cdf[i] && cdf[i] > 0.125) {
42 r[i] <- 3
43 } else if (0.125 > cdf[i] && cdf[i] > 0.1) {
44 r[i] <- 4
45 } else if (0.1 > cdf[i] && cdf[i] > 0.0875) {
46 r[i] <- 1
47 } else if (0.0875 > cdf[i] && cdf[i] > 0.075) {
48 r[i] <- 2
49 } else if (0.075 > cdf[i] && cdf[i] > 0.0625) {
50 r[i] <- 3
51 } else if (0.0625 > cdf[i] && cdf[i] > 0.05) {
52 r[i] <- 4
53 } else if (0.05 > cdf[i] && cdf[i] > 0.0375) {
54 r[i] <- 1
55 } else if (0.0375 > cdf[i] && cdf[i] > 0.025) {
56 r[i] <- 2
57 } else if (0.025 > cdf[i] && cdf[i] > 0.0125) {
58 r[i] <- 3
59 } else if (0.0125 > cdf[i] && cdf[i] > 0) {
60 r[i] <- 4
61 } else {
62 r[i] <- 0
63 }
64 h[i] <- w[i] * r[i]
65 }
66 est$w <- w
67 est$r <- r
68 est$peligro <- h
69 est[,1] <- as.Date(est[,1], origin = "1900-01-01")
70 ww <- est
71 nombre_archivo <- paste("DHI_", hoja, ".xlsx", sep = "")
72 setwd("C:/Users/krito/Desktop/Angulo/nueva estacion")
73 write.xlsx(ww, nombre_archivo)
74 }

```

c) Correlación del SPI *in situ* con SPI satelital

Con el fin de actualizar la información del SPI se recurrió a las imágenes satelitales, con ayuda de GEE, las colecciones MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m (Didan, 2021) y CHIRPS Daily: Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final) (Funk et al., 2015), así como el código proporcionado por UN-SPIDER (s.f.-b) para la obtención del SPI. Se buscaba que las imágenes contaran con una buena correlación con los resultados obtenidos de la estaciones.

Las correlaciones se realizaron desde el año 2001 hasta el 2017, teniendo una primera correlación anual favorable, como se muestra en la Figura 59.

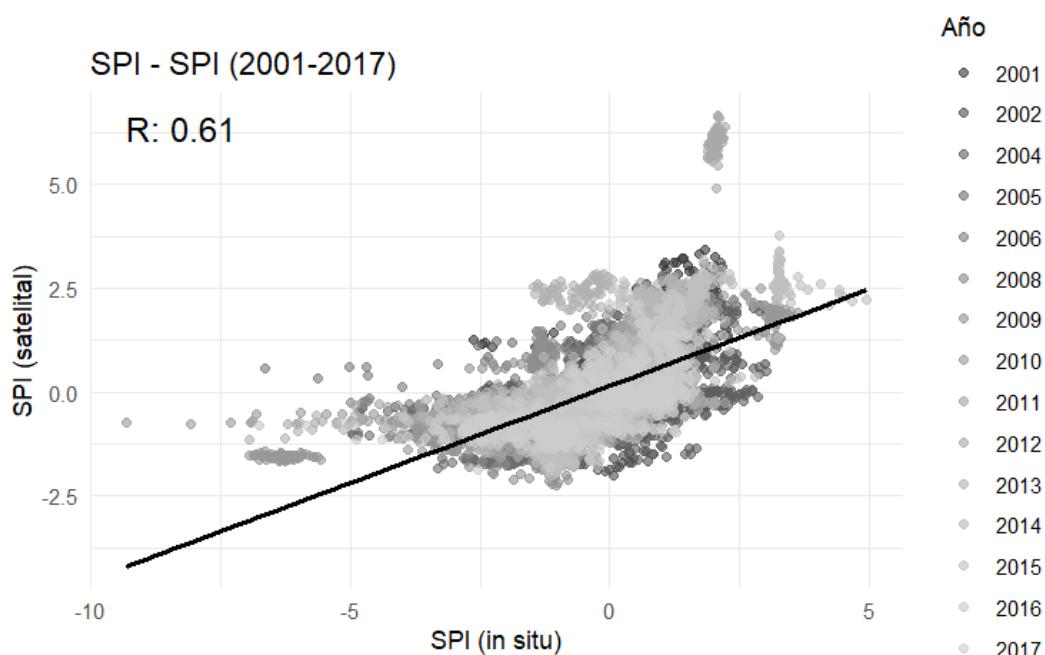


Figura 59. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ*.

Sin embargo, al hacer las correlaciones mes a mes, se encontraron resultados poco favorecedores, como se muestran de la Figura 60 a la Figura 74.

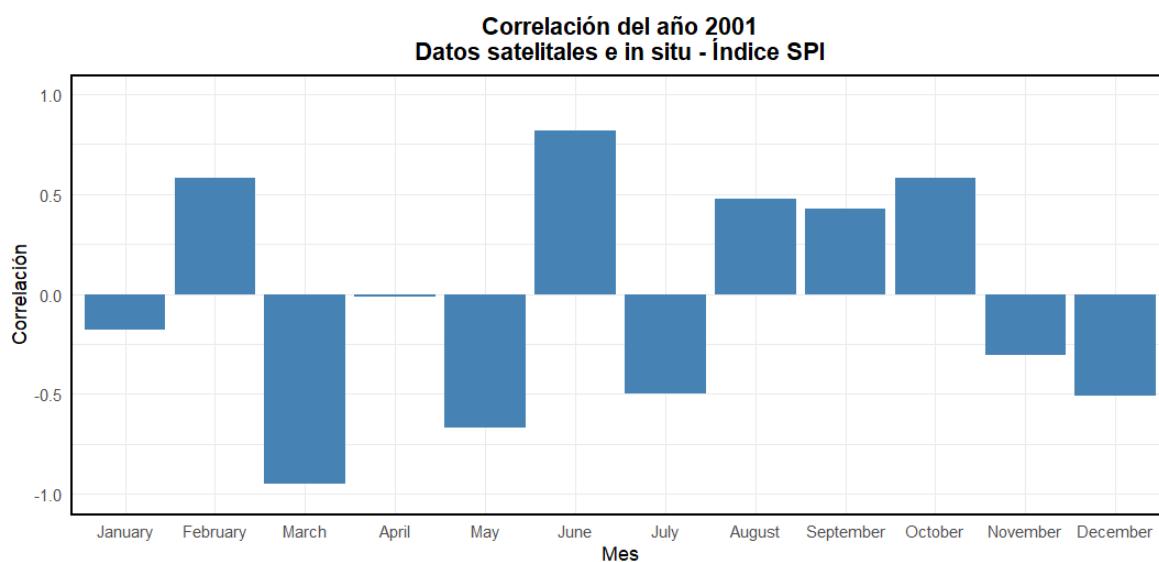


Figura 60. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2001.

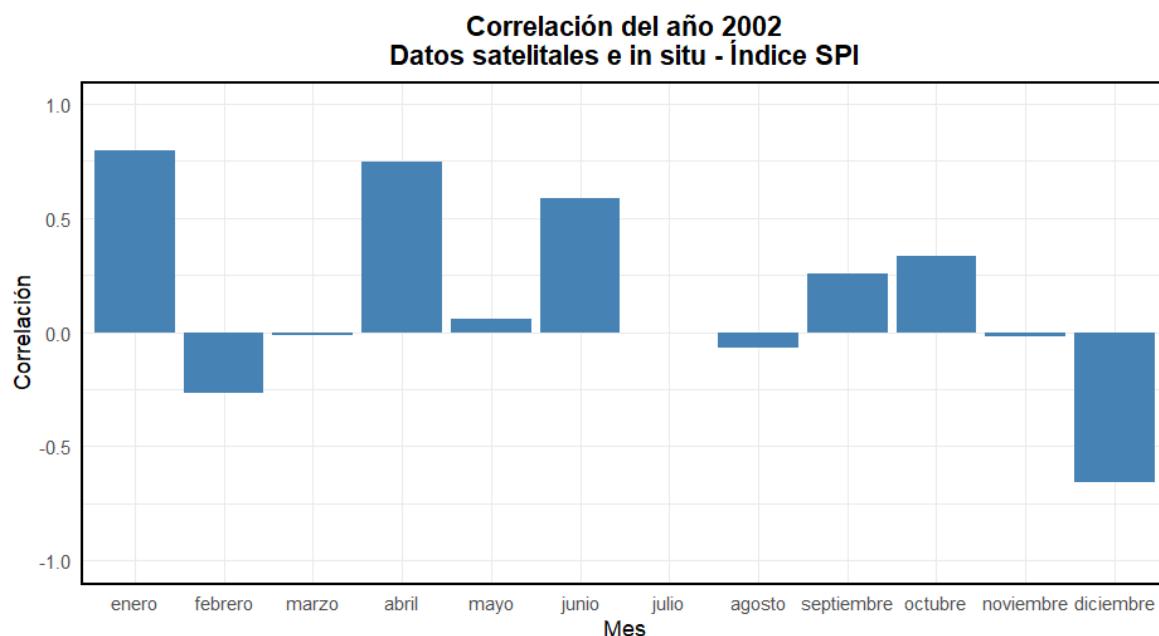


Figura 61. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2002.

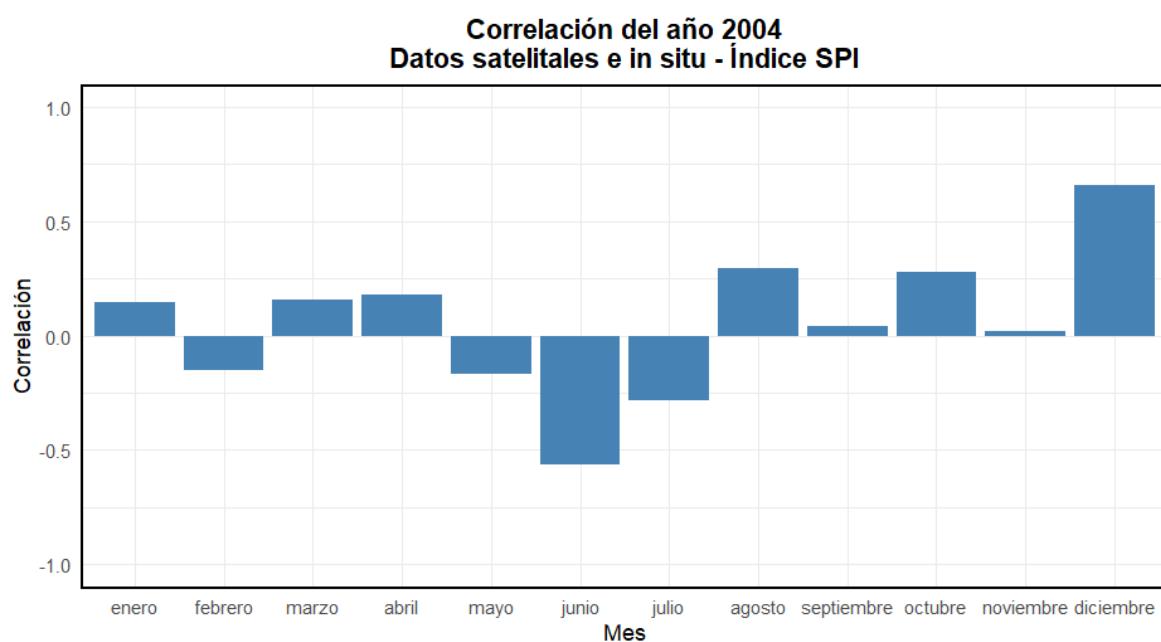


Figura 62. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2004.

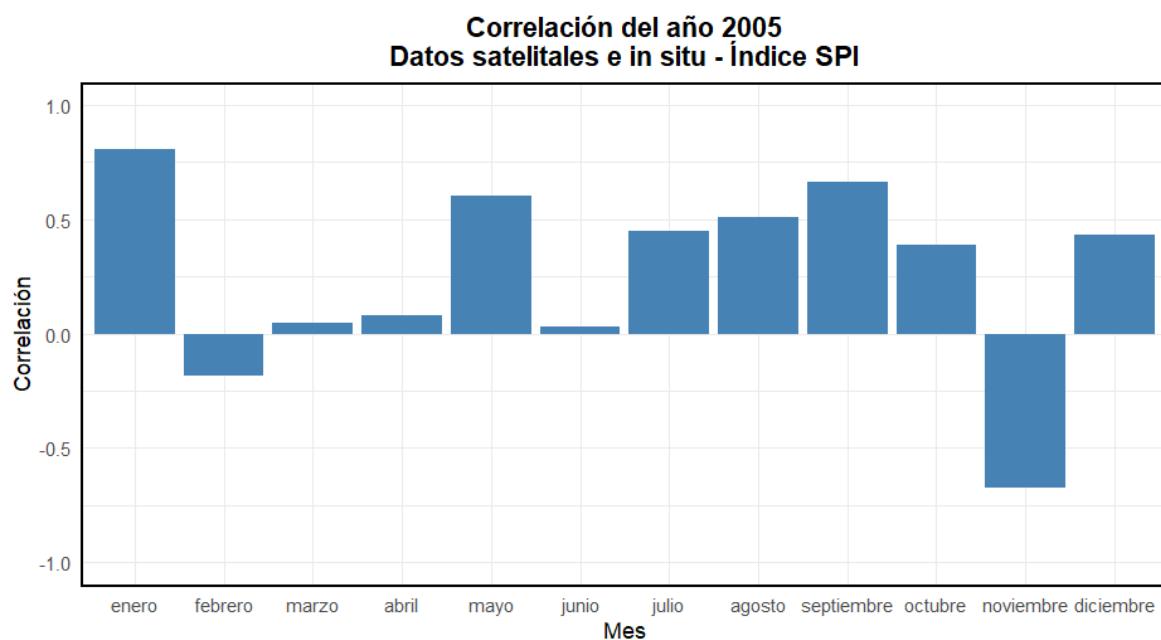


Figura 63. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2005.

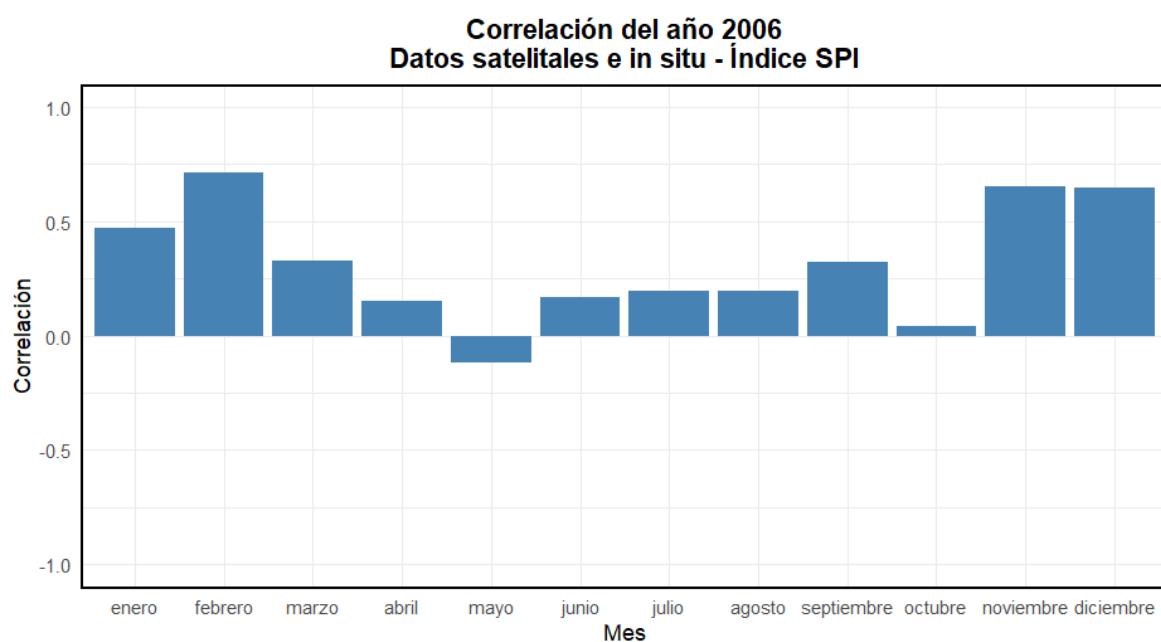


Figura 64. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2006.

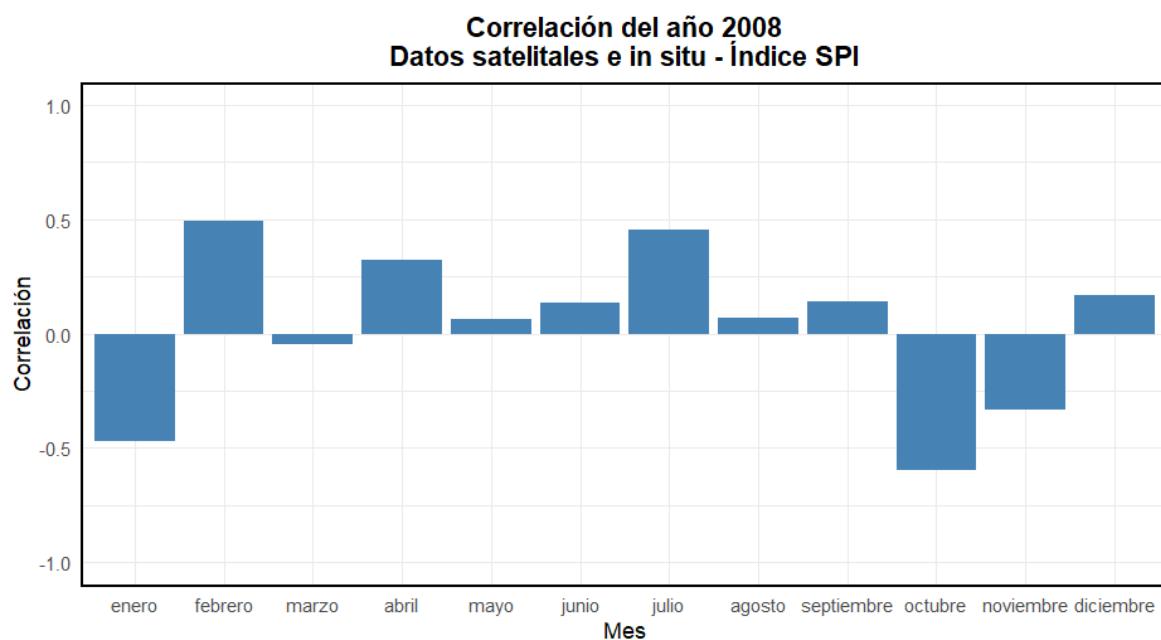


Figura 65. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2008.

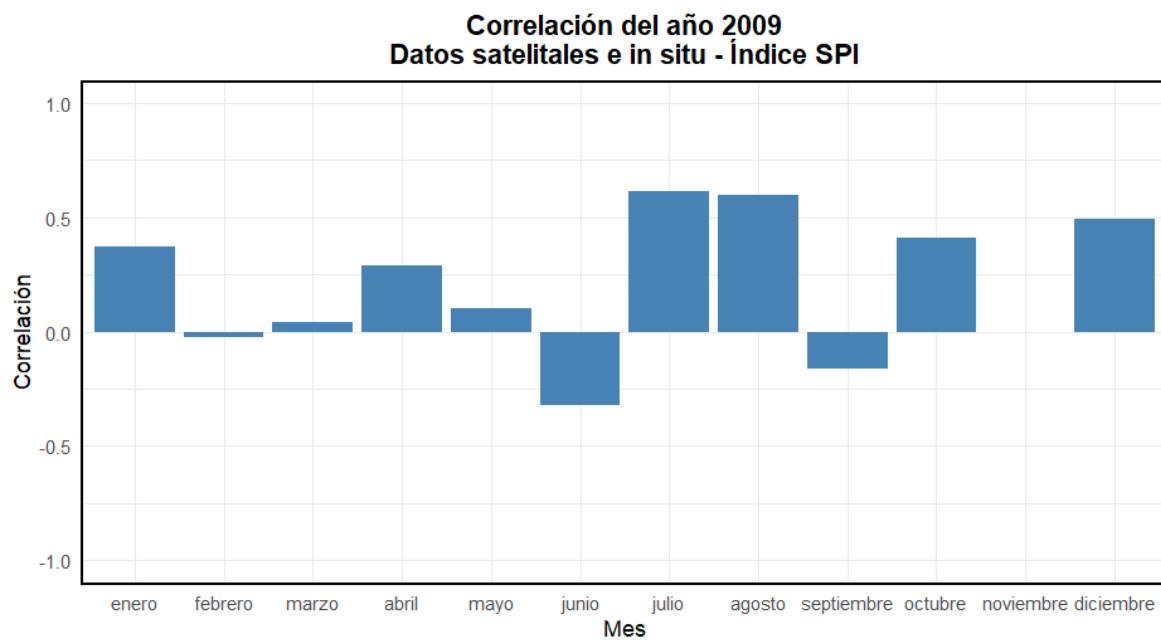


Figura 66. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2009.

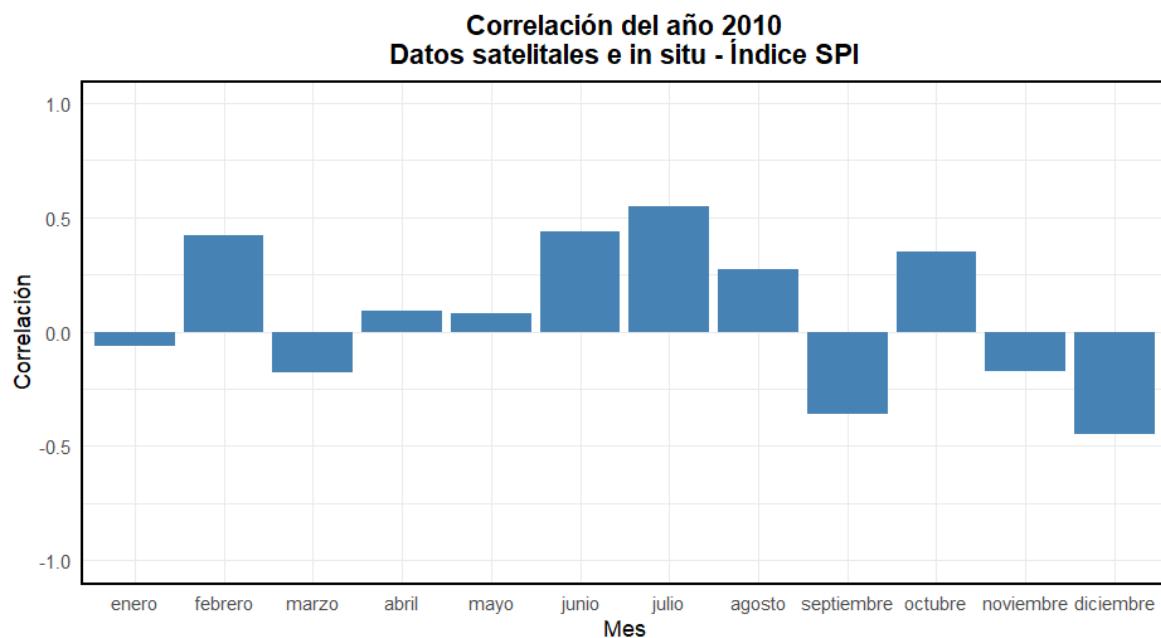


Figura 67. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2010.

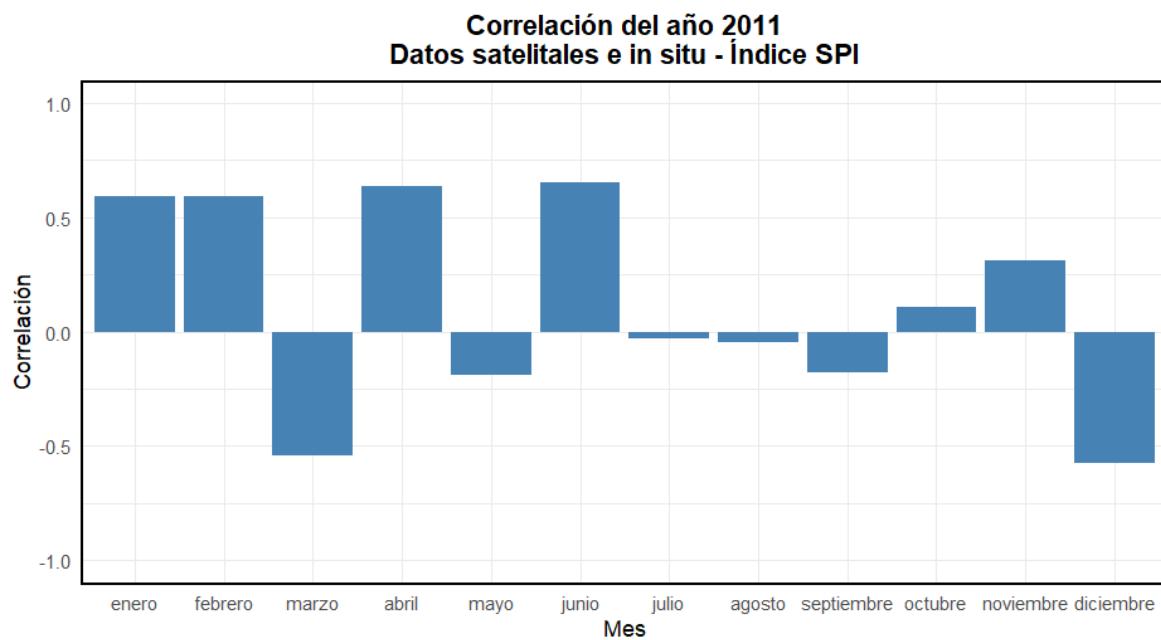


Figura 68. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2011.

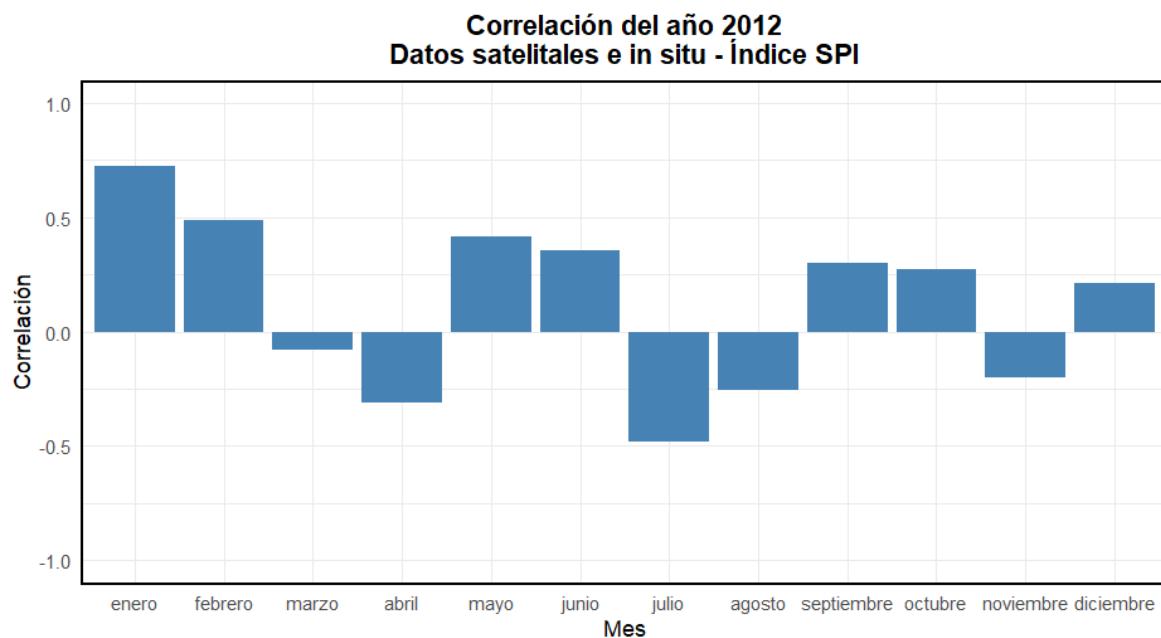


Figura 69. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2012.

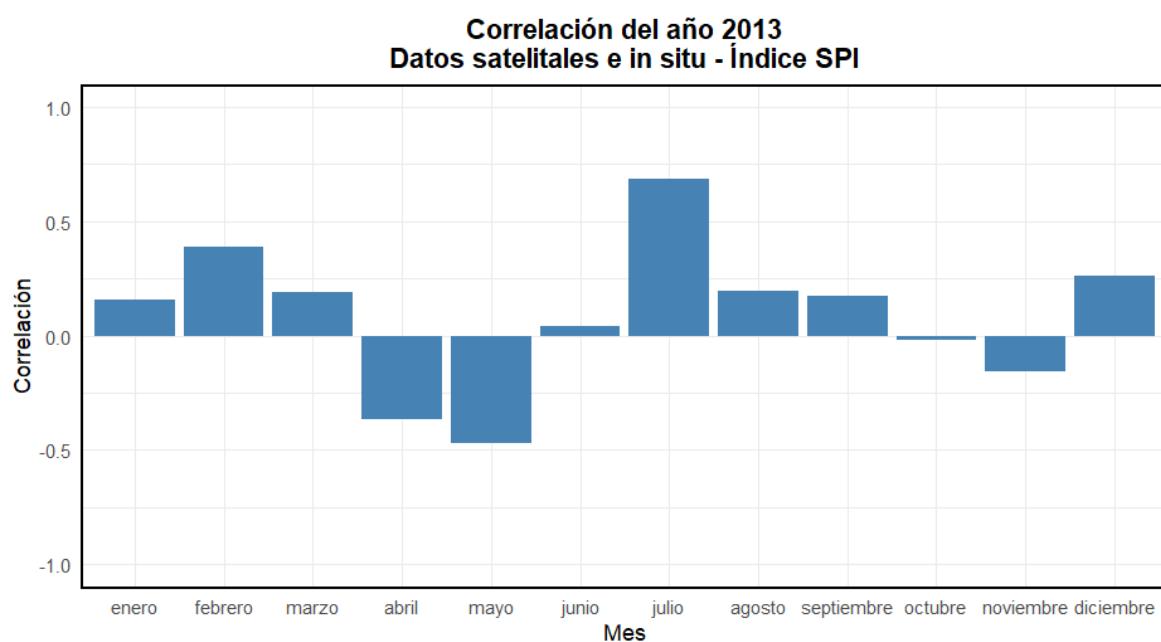


Figura 70. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2013.

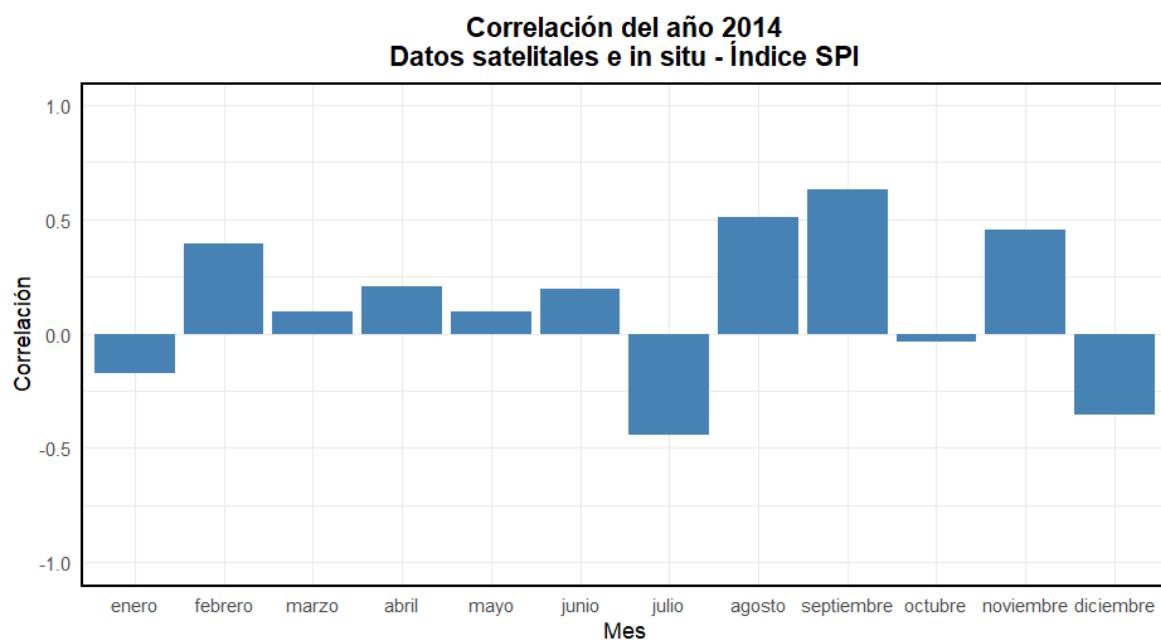


Figura 71. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2014.

**Correlación del año 2015
Datos satelitales e in situ - Índice SPI**

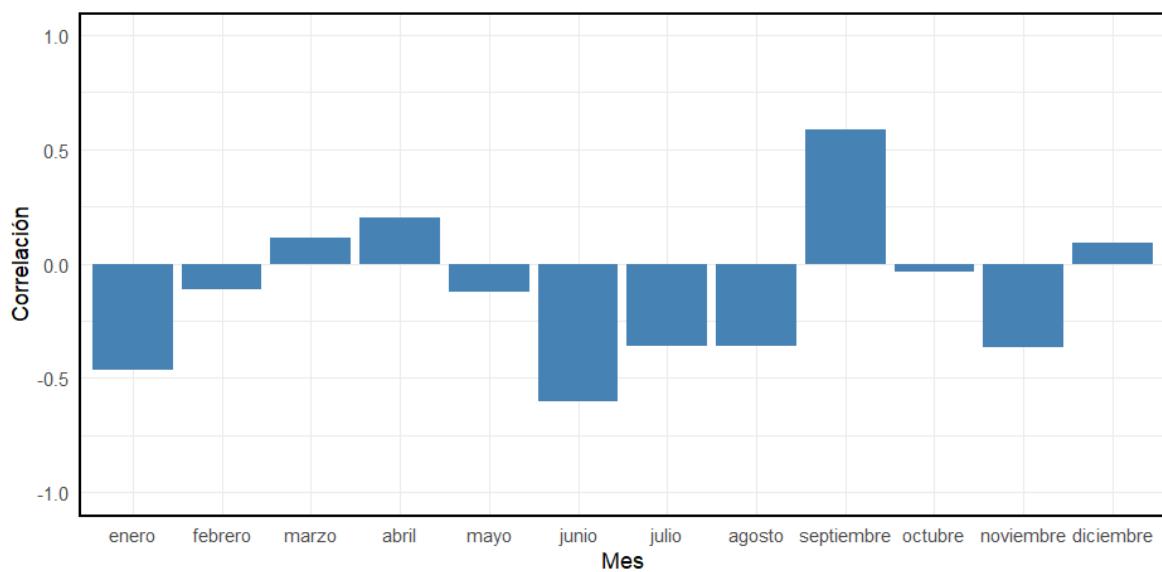


Figura 72. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2015.

**Correlación del año 2016
Datos satelitales e in situ - Índice SPI**

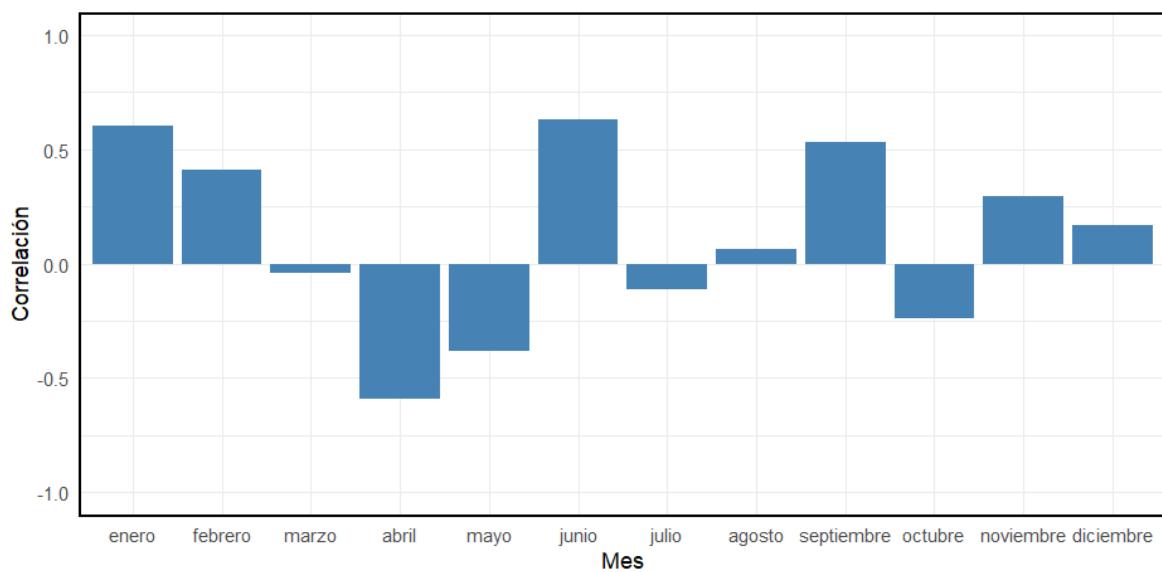


Figura 73. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2016.

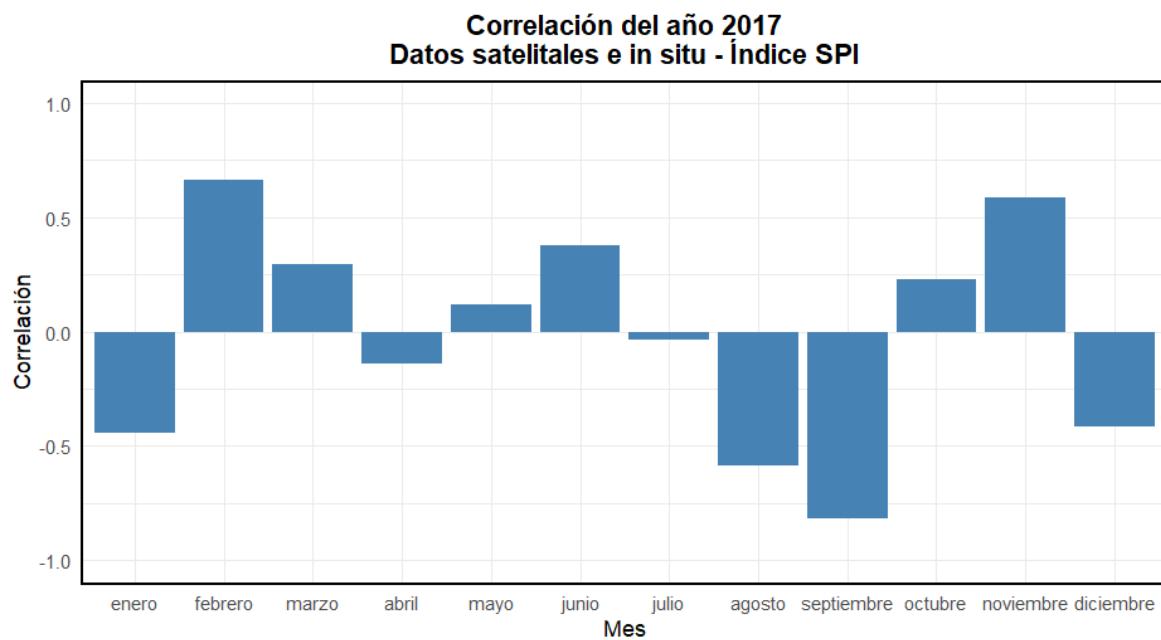


Figura 74. Correlación SPI satelital vs SPI *in situ* para el año 2017.

De entre todas la correlaciones se destaca la del año 2006, Figura 64, ya que 11 de los meses presentan una correlación positiva.

Dado a que los resultados no fueron satisfactorios, se descartó la posibilidad de actualizar el SPI con imágenes satelitales.

Carolina Rocha Delgado

Determinación del riesgo ante sequías en la cuenca del Río Angulo.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:456339945

135 Páginas

Fecha de entrega

6 may 2025, 1:38 p.m. GMT-6

23.464 Palabras

Fecha de descarga

7 may 2025, 2:13 p.m. GMT-6

126.661 Caracteres

Nombre de archivo

Determinación del riesgo ante sequías en la cuenca del Río Angulo.pdf

Tamaño de archivo

9.0 MB

23% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
-

Top Sources

22%	Internet sources
10%	Publications
0%	Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

Replaced Characters

19 suspect characters on 7 pages

Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Carolina Rocha Delgado	
Título del trabajo	Determinación del riesgo ante sequías en la cuenca del río Angulo	
Autor/es	Nombre	Correo electrónico
	Carolina Rocha Delgado	<u>1612420j@umich.mx</u>
Director	Jorge Alejandro Ávila Olivera	<u>alejandro.avila@umich.mx</u>
Codirector	José Jaime Madrigal Barrera	<u>jose.madrigal@umich.mx</u>
Coordinador del programa	Sonia Tatiana Sánchez Quispe	<u>quispe@umich.mx</u>

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro		

Datos del solicitante

Nombre y firma	Carolina Rocha Delgado	
Lugar y fecha	Morelia, Mich. 28 de abril de 2025	