



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“MODELO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL PARA EVALUAR EL RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO GALLINAS”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA**

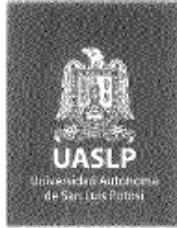
**PRESENTA:**

**ING. GLORIA MARIEL FONSECA MORAZÁN**

**ASESOR:**

**DR. ABRAHAM CÁRDENAS TRISTÁN**

**SAN LUÍS POTOSÍ, ENERO DEL 2024**



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

19 de enero de 2023

**ING. GLORIA MARIEL FONSECA MORAZÁN  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Abraham Cárdenas Tristán**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de enero del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Modelo de distribución espacio-temporal para evaluar el riesgo ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas"**

Introducción.

1. Características del área de estudio y variables que inciden en el riesgo ambiental del agua.
2. Análisis espacio-temporal para la determinación de un patrón de comportamiento de elementos que inciden ambientalmente la cuenca del Río Gallinas.
3. Cálculo del índice de riesgo ambiental del agua en la cuenca del río Gallinas.
4. Análisis de la distribución espacial del riesgo ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas a través de representación por series de tiempo.
5. Discusión de resultados.

Conclusiones.

Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN  
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CATEDRA DE INGENIERÍA



[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria - CP. 76700  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 626 7330 a 019  
fax (444) 626 7336

Copia. Archivo.  
\*etn.

"UASLP, más de un siglo educando con autonomía"

## **Agradecimientos**

A mi familia, mi padre Mauricio Fonseca y mi madre Gloria Morazán, gracias por ser mi pilar, mi guía y mi fortaleza en mi caminar por la vida. Gracias por todo su amor incondicional.

A mi novio Raúl Hernández, gracias por motivarme, por tomar mi mano para seguir avanzando día a día. Gracias por hacer de San Luis mi hogar.

A mis compañeros de maestría, en especial a Karen Cáceres y Angie Calderón por su apoyo académico, pero principalmente por las risas y los llantos que vivimos durante este proceso.

Agradezco a los docentes de la maestría por haber compartido sus conocimientos, en especial al Dr. Abraham Cárdena Tristán por haberme brindado su guía, asesoría y paciencia en el desarrollo de la investigación.

Agradezco a todas las personas que han sido parte de este proceso académico.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	8
ANTECEDENTES.....	11
ESTADO DEL ARTE SOBRE LA TEMÁTICA DE ESTUDIO .....	14
HIPÓTESIS.....	29
OBJETIVOS.....	29
METODOLOGÍA.....	30
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO Y VARIABLES QUE INCIDEN EN EL RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA.....	32
1.1. Área de estudio.....	32
1.1.1. Ubicación geográfica.....	32
1.1.2. Hidrografía .....	33
1.1.3. Clima .....	33
1.1.4. Tipos de suelo .....	36
1.2. Recolección de datos .....	38
1.3. Indicadores económicos, ambientales, sociales y naturales.....	39
1.4. Indicadores de usos y consumos de agua en la zona de estudio .....	40
1.5. Análisis del Producto Interno Bruto (PIB) sobre las actividades económicas de la zona de estudio.....	41
1.6. Definición de factores y variables que inciden en el riesgo ambiental del agua.....	43
1.7. Justificación de los peligros naturales/antropogénicos .....	44
1.8. Elementos de variables considerados como vulnerables.....	46
1.9. Proceso de evaluación del riesgo ambiental del agua .....	47
1.9.1. Justificación de la metodología de evaluación.....	47
1.9.2. Matriz de evaluación .....	47
1.10. Determinación de los riesgos ambientales del agua.....	48
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL PARA LA DETERMINACIÓN DE UN PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS QUE INCIDEN AMBIENTALMENTE LA CUENCA DEL RÍO GALLINAS.....	54
2.1. Descripción y elementos que conforman el análisis espacio-temporal.....	54
2.2. Procesos de correcciones radiométricas y atmosféricas a las imágenes de satélite .....	54
2.3. Métodos para el cálculo del comportamiento espacio-temporal .....	56
2.3.1. Cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI).....	56

2.3.2. Cálculo del índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI).....	60
2.3.3. Análisis del cambio de uso de suelo de la zona de estudio.....	63
2.3.4. Cálculo y análisis de la evapotranspiración de la zona de estudio.....	66
2.3.5. Cálculo del índice de Radiación Solar de la zona de estudio.....	70
2.3.6. Cálculo del índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	72
<b>CAPÍTULO 3. CALCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RIO GALLINAS.</b> .....	<b>76</b>
3.1. Determinación de los principales riesgos para la temática del proyecto.....	76
3.2. Ponderación de variables por medio del Proceso Analítico Jerárquico .....	79
3.3. Pesos de las variables evaluadas dentro del modelo espacial .....	80
3.3.1. Matriz del juicio de la estructura determinada .....	81
3.4. Resultados del Modelo del Índice de Riesgo Ambiental del Agua (WERI).....	84
3.4.1. Cálculo de índice de riesgo ambiental del agua .....	82
3.5. Mapas temáticos describiendo el riesgo ambiental del agua.....	85
3.5.1. Análisis del peligro ambiental del agua .....	85
3.5.2. Análisis de la exposición ambiental del agua.....	88
3.5.3. Análisis de la vulnerabilidad ambiental del agua.....	90
3.5.4. Análisis del riesgo ambiental del agua.....	92
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO GALLINAS A TRAVÉS DE REPRESENTACIÓN POR SERIES DE TIEMPO</b> .....	<b>94</b>
4.1. Elementos sobre el modelado de la distribución espacial y sus aplicaciones en el manejo de recursos naturales. ....	94
4.2. Manejo de variables para la generación de series de tiempo .....	94
4.3. Series de tiempo para representar los riesgos ambientales del agua en los próximos 5, 10 y 15 años.....	96
4.3.1. Consumo de agua en los proximos 5, 10 y años .....	95
4.3.2. Crecimiento poblacional en los próximos 5, 10 y 15 años .....	99
4.3.3. Consumo de agua para la agricultura en los próximos 5, 10 y 15 años .....	102
<b>5.DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>107</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>113</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>115</b>

## Índice de tablas

Tabla 1: Areas de afectación de la sequía.....	12
Tabla 2: Indicadores de usos y consumos de agua .....	39
tabla 3: Actividades económicas en la cuenca del Río Gallinas.....	41
Tabla 4: Matriz de evaluación de riesgo .....	48
Tabla 5: Niveles de impacto .....	53
Tabla 6: Fecha de las imágenes satelitales utilizadas .....	57
Tabla 7: Estaciones meteorológicas utilizadas para dato de temperatura mensual .....	67
Tabla 8: Valores del índice normalizado de precipitación.....	73
Tabla 9: Matriz de riesgos ambientales del agua.....	77
Tabla 10: Escala de comparación del proceso jerárquico analítico .....	80
Tabla 11: Matriz de niveles de la evaluación de indicadores .....	81
Tabla 12: Resultado de la matriz de prioridades.....	83
Tabla 13: Consumo de agua año 2025 .....	96
Tabla 14: Consumo de agua año 2030.....	98
Tabla 15 Consumo de agua año 2035 .....	99
Tabla 16. Crecimiento poblacional año 2025 .....	100
Tabla 17. Crecimiento poblacional año 2030 .....	101
Tabla 18. Crecimiento poblacional año 2035 .....	102
Tabla 19. Agua para agricultura año 2025.....	103
Tabla 20. Agua para agricultura año 2030.....	104
Tabla 21. Agua para agricultura año 2035.....	105

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de los trópicos .....	15
Figura 2. Escasez física y/o económica del agua.....	20
Figura 3: Fases de la planificación e implementación de GIRH, ONU 2014.....	27
Figura 4: Diagrama general de metodología .....	30
Figura 5. Ubicación cuenca del Río Gallinas.....	33
Figura 6. Ubicación hidrográfica de la cuenca del Río Gallinas .....	34
Figura 7. Tipos de climas en la cuenca del Río Gallinas .....	36
Figura 8. Tipos de suelo en la cuenca del Río Gallinas .....	38
Figura 9. Mapa del producto interno bruto en la cuenca del Río Gallinas.....	42
Figura 10. Espectro de peligros .....	45
Figura 11. Análisis del comportamiento NDVI 1990-2020.....	59
Figura 12. Variación del NDVI en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020 .....	62
Figura 13. Uso y cambio de suelo.....	64
Figura 14. Uso del suelo y de vegetación 1990-2020.....	65
Figura 15. Gráfico de evapotranspiración mes de abril años 1990, 2000, 2010 y 2020.....	68
Figura 16. Evapotranspiración en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020.....	69
Figura 17. Radiación solar de la cuenca del Río Gallinas 1990-2020 .....	70
Figura 18. Comportamiento de las precipitaciones en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020 ....	75
Figura 19. Matriz de riesgos ambientales del agua.....	798
Figura 20. Distribución del peligro ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020 .....	87
Figura 21. Distribución de la exposición ambiental del agua 1990-2020.....	89
Figura 22. Distribución de la vulnerabilidad ambiental del agua 1990-2020.....	91
Figura 23. Distribución del riesgo ambiental del agua 1990-2020.....	93
Figura 24. Gráfica consumo de agua año 2025.....	97
Figura 25. Gráfica consumo de agua año 2030.....	98
Figura 26. Gráfica consumo de agua año 2035.....	99
Figura 27. Gráfica crecimiento poblacional año 2025.....	99
Figura 28. Gráfica crecimiento poblacional 2030.....	101
Figura 29. Gráfica crecimiento poblacional 2035.....	102
Figura 30. Gráfica agua para agricultura año 2025.....	103
Figura 31. Gráfica agua para agricultura año 2030.....	104
Figura 32. Gráfica agua para agricultura año 2035.....	105

## INTRODUCCIÓN

A través del tiempo los seres humanos han utilizado elementos del ecosistema para alcanzar el bienestar mediante el conocimiento transmitido de generación en generación, el cual ha sido compartido entre los miembros de la sociedad por medio de la observación, la clasificación y las perspectivas del mundo, sin embargo, el uso desmedido ha estresado a ecosistemas enteros. Diversos gobiernos, municipios, entidades urbanas y rurales, así como la iniciativa privada han implementado la gestión ambiental a partir de acciones que buscan orientar y alentar cambios en las estrategias económicas y sociales, impulsadas por políticas ambientales para encontrar respuestas adecuadas a dichas modificaciones antropogénicas. Según Van der Molen (2018), el uso y aprovechamiento de los recursos del medio ambiente se debe equilibrar de manera sostenible.

El riesgo es la probabilidad de alterar o sobrepasar situaciones económicas, sociales y ambientales en un cierto espacio-tiempo. Para hablar de riesgo también se debe tomar en cuenta las amenazas que se refieren de forma matemática a la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad siendo clave el sitio y la exposición de tiempo. La vulnerabilidad también es otro factor de riesgo que se expresa como la factibilidad de que el sujeto o sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza. Al conformar una sociedad urbana e industrializada que requiere recursos naturales infinitos, existe el riesgo del desbalance y una sobreexplotación de recursos finitos en todos los ecosistemas (Cardona, 2003).

La gestión de los recursos naturales debe abordarse desde una amplia perspectiva, teniendo en cuenta todas las concesiones potenciales y las diferentes escalas en el espacio y el tiempo. Para esto, la sociedad debe estar informada sobre los riesgos ambientales promoviendo así, la toma de decisiones para un beneficio a largo plazo (Valadéz y Landa, 2003). Los actores gubernamentales en la sociedad deben implementar herramientas de gestión ambiental estratégicos, impulsar políticas y acciones planificadas que contribuyan a promover el proceso sostenible, la protección efectiva del medio ambiente, supervisar las actividades industriales, además de ejecutar y promover actividades educativas en temas socio-ambientales.

Por esta razón, se introduce la determinación del riesgo ambiental, la cual analiza la interacción de tres componentes que son el peligro, la vulnerabilidad y la exposición. En la fase de evaluación



se identifican los peligros y factores potenciales de riesgo que puedan llegar a causar daño en el entorno. Dicha valoración se ha convertido en una herramienta para consolidar estrategias de gestión para reducir el impacto, tanto a nivel gubernamental y empresarial.

El término referente al análisis del riesgo ambiental del agua data de la década de 1970, cuando la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) decide unificar los procesos de la metodología del análisis de riesgos ambientales (Comité del Consejo Nacional de Investigación (EE.UU.) para mejorar los enfoques de análisis de riesgos utilizados por EE.UU. (EPA), 2009).

Por lo tanto, el análisis del riesgo ambiental del agua es el proceso de determinar todos los impactos potenciales en el medio ambiente del agua y estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos ambientales relacionados a la misma. Mediante el análisis del riesgo se pueden identificar áreas de alto riesgo, como propuestas subsecuentes el análisis y prevención de riesgos del agua, el control y la gestión de estrategias de mitigación. El aspecto de los riesgos del agua actualmente incluye riesgo a la salud, al medio ambiente y de tipo económico causados por la contaminación del agua (Cui, y al., 2021).

La importancia de analizar riesgos corresponde a crear conciencia de los peligros y así identificar quién se expone y quién es vulnerable, y a su vez realizar controles que prevengan o mitiguen los daños a terceros.

La determinación del riesgo ambiental del agua es una importante perspectiva para la gestión de los recursos hídricos, ya que se puede visualizar alternativas de respuesta a la diversidad de problemáticas a prevenir en los ecosistemas (Zeleňáková, Kubiak-Wojcicka, Weiss, Weiss, y Abd, 2021).

Uno de los factores directos de la problemática descrita es el crecimiento poblacional, que ha ocasionado el aumento de actividades económicas como la agricultura y la ganadería para cumplir con la demanda alimenticia; también se ha aumentado la producción de energía y la conformación de más industrias.

México siendo el décimo país más poblado del mundo (Agencia de la ONU para los refugiados ACNUR, 2019) con casi 127,237,648 personas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía ,INEGI, 2020) presenta un consumo desmedido de recursos.

En lo particular y para el estado de San Luis Potosí, un estado con cuatro regiones diferentes, la Huasteca Potosina es una región semi-tropical, con una riqueza ecosistémica de fuentes hídricas considerables. En la actualidad los recursos hídricos se han destinado principalmente a las actividades agropecuarias, turismo y a la construcción de infraestructuras hidráulicas (Pereda & Padilla, 2016), los cuales actualmente están presentando impactos negativos. Por tal motivo, se desarrolló este trabajo de investigación en el que se aborda un análisis en la cuenca del Río Gallinas, en donde en época de verano la emblemática cascada Tamul y otros cuerpos de agua sufren alteraciones antropogénicas considerables. De manera que el corte de flujo de recursos hídricos que se ha presentado en los últimos años ha llamado la atención de pobladores, turistas, científicos y políticos que se han enfocado por encontrar la causa-raíz de este acontecimiento.

Por lo tanto, para contribuir al conocimiento de la problemática precedentemente descrita, en este estudio se describe un modelo de distribución espacio-temporal para el periodo 1990 - 2020, basado en la combinación del proceso analítico jerárquico y el uso de tecnologías SIG. como importantes herramientas integradoras para el análisis espacial de riesgos en las diferentes ramas ambientales, así como a escala global o comunitaria.

Estas tecnologías geoespaciales han permitido el análisis de riesgos del agua con diversas metodologías aplicadas, permitiendo conocer y salvaguardar la prevención del recurso de forma emergente y a través de análisis multitemporales.

Dentro de las etapas del desarrollo de este modelo se obtiene el índice de riesgo ambiental del agua para la cuenca del Río Gallinas, en el cual, dicho índice plasma las principales variables de peligro, vulnerabilidad, exposición, gestión regional y la interacción que existe entre lo económico y social. La matriz de riesgo que se presenta para determinar los principales peligros se concentró principalmente en los peligros antropogénicos, priorizando riesgos físicos como la capacidad de carga ambiental del agua, y la calidad de ésta. En la realización de este análisis, se pretende contribuir a tomar decisiones sostenibles para proteger, y conservar los recursos hídrico-ambientales dentro de la cuenca del Río Gallinas.

## ANTECEDENTES

La Huasteca Potosina es un ecosistema considerable para ejercer estudios ambientales, debido a su importancia hídrica, forestal, su biodiversidad y por su potencial turístico. A su vez, la cuenca del Río Gallinas también ha llamado la atención de la comunidad científica por los efectos o impactos que han interrumpido el flujo hídrico que atraviesa a la cascada Tamul en época de estiaje, por lo que ciertos trabajos de investigación se han enfocado en la sequía y en su geomorfología. También se han realizado estudios de los afluentes del Río Gallinas, como es el río Tamasopo, este afluente es importante ya que se ubica en la ciudad más poblada y turística de la cuenca.

En las últimas décadas la cuenca del Río Gallinas ha sufrido alteraciones considerables en sus ecosistemas, dado que en gran medida los recursos hídricos de la zona están cambiando por diversas acciones humanas y naturales. Lamentablemente, en esta cuenca llena de bellezas naturales, persisten descontrol ambiental tales como: las descargas de aguas negras a los ríos y cuerpos de agua, la emisión de detergentes, basura y otras soluciones tóxicas, como la alteración de los cauces a los afluentes y cuerpos de agua.

La cuenca también se ha visto muy afectada por la sequía, principalmente en los municipios de Aquismón y Tamasopo, presentando sequía extrema en los últimos años.

En el trabajo de investigación realizada por Algara M., Contreras, Galindo, y Mejía, (2009) se midió el impacto de la sequía en las regiones agropecuarias de la Huasteca Potosina con el Índice de Severidad de la Sequía, el cálculo de la moda de precipitación ajustada a la función gamma incompleta y la correlación del índice de severidad de la sequía con el cambio de uso de suelos. Los resultados se muestran en la Tabla 1, concluyendo que las áreas de sequía muy fuerte han disminuido, las áreas de sequía severa se han incrementado y ha aparecido una pequeña región de sequía muy severa en el periodo 1985-2000.

Tabla 1: Áreas de afectación de la sequía

Periodos	Sequía fuerte (ha)	Sequía muy fuerte (ha)	Sequía severa (ha)	Sequía muy severa
1961-1973	84	1,106,189	23,002	
1973-1985	3,063	910,668	215,544	
1985-2000	259	426,717	700, 838	1,461

Fuente: Algara, Contreras, Galindo, y Mejía (2009)

El cese del flujo de agua en la cascada Tamul en época seca ha generado múltiples opiniones sobre la causa de este acontecimiento, pero sin duda alguna, el fenómeno impacta negativamente al ecosistema, a las personas que viven del turismo y hace evidente la mala gestión de las autoridades competentes.

Se realizó un trabajo para determinar las causas de la desaparición del flujo hídrico y que atraviesa la cascada Tamul, proceso efectuado a través del model EFDC en diferentes tramos del río (Rodríguez, Hernández, Cauder, Hernández, y Padilla, 2022). En el estudio se midió flujo y velocidad, utilizando técnicas de fotogrametría, batimetría y modelización digital de elevación. Por lo cual, los datos utilizados se obtuvieron en campañas de medición de 2017 a 2018. Se establecieron cinco escenarios con diferentes condiciones de contorno de flujo de entrada: 1,5, 30, 60 y 1000 m<sup>3</sup>/s. En la modelación se pudo concluir que la extracción clandestina de agua y la geomorfología kárstica genera una infiltración específica, ya que no se obtuvo en ningún escenario de modelación la pérdida total del flujo. También se afirma que la variación del flujo del río no puede atribuirse enteramente a las características geológicas de la zona. Por lo tanto, la extracción clandestina de agua se da por el cultivo de caña que es uno de los principales sectores económicos de la cuenca, situación que la CONAGUA, CEA, COTAS y los diversos gestores del recurso de la zona deben gobernar adecuadamente.

En el estudio Zonificación productiva cañera en Huasteca Potosina, México (Aguilar, Galindo, Contreras, y Fortanelli, 2010) se evaluó la distribución espacial caracterizando el nivel de productividad del cultivo. En la Huasteca se localizan los ingenios San Miguel, El Naranja y Plan de San Luis (municipios El Naranja y Ciudad Valles) predominan los cañaverales con nivel de

productividad alta y media. Al Este, Centro y Sur en la zona de abasto de los ingenios Plan de Ayala y Alianza Popular (municipios Tamasopo, Tamuín, Aquismón, San Vicente y Tanlajas) prevalecen zonas con productividad media a muy baja. La investigación concluye que, considerando la variabilidad de los factores productivos, se puede hacer un manejo más eficiente con la aplicación de insumos de acuerdo con las necesidades y al potencial de los predios cañeros. La deficiencia en la aplicación de insumos puede llevar a los cañeros y grandes ingenios a utilizar mayores cantidades de agua para lograr los porcentajes de productividad.

Por otro lado, el río Gallinas recibe afluentes del río Tamasopo, los cuales se contaminan por las aguas residuales de los drenajes de la cabecera municipal y del ingenio cercano. La población de Tamasopo ha denunciado la contaminación del río por las descargas de aguas residuales del ingenio “Alianza Popular” de Tambaca (Castro, 2018).

La planta de tratamiento ubicada en Agua Buena, Tamasopo que se desarrolló con una inversión de 1.6 millones de pesos (Gobierno de San Luis Potosí, 2009), no está funcionando lo que ocasiona un riesgo sanitario a los ríos y a la población. Para 2018 (Secretaría de desarrollo social y regional San Luis Potosí) se tenía prevista la ampliación del drenaje sanitario de Tambaca con una inversión de 2,171,744.92 mdp.

El deterioro de los cuerpos de agua conlleva a una pérdida económica a los sectores agrícola y turismo. A su vez, el crecimiento insostenible de estos dos sectores causa la decadencia de los recursos hídricos de la cuenca.

Giraldo (2013) muestreó la calidad de agua de Puente de Dios, un paraje turístico de gran importancia para la zona, y como resultado obtuvo que los coliformes fecales y totales se encontraban fuera de la norma 127, lo que indica contaminación por descargas doméstica que no son tratadas adecuadamente.

En el estudio (Dávila, Algara, y Velázquez, 2020) se realizó una cadena de modelación para evaluar el impacto del cambio climático en la cuenca del Río Gallinas y la cuenca del Río Valles. Se consideraron indicadores hidrológicos de caudal medio, además, se consideraron caudales altos con un periodo de retorno de 2, 10 y 100 años. Se obtuvo que la variabilidad es importante en el impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos, pero es necesario tener en cuenta

que la afectación a la población también se da por el riesgo del evento extremo y la vulnerabilidad social se interceptan. Se determina la necesidad de realizar cambios profundos en los procesos y las prácticas de manejo de los recursos hídricos que conduzcan a un desarrollo sustentable y más equitativo.

La variabilidad climática es un riesgo que afectará a la población y los recursos hídricos en el área de estudio. En la investigación (Rios, 2018) concluye que la Huasteca Potosina es más afectada en la zona montañosa ya que por la vegetación densa se está disminuyendo el bosque y aumentando la temperatura. Se identificó un incremento de  $0.42^{\circ}\text{C}$  en la zona de la planicie  $1.2^{\circ}\text{C}$  en la zona montañosa para los próximos 30 años.

Según (Jabardo y Padilla, 2016) el inadecuado manejo de los recursos hídricos en la Huasteca Potosina, como la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la contaminación del agua, han provocado su escasez, lo que tiene consecuencias ambientales y económicas, además de crear conflictos locales entre las entidades municipales y estatales y los usuarios locales, debido a que se han presentado deficiencias en la gestión del agua. La seguridad hídrica del área es todo un desafío, ya que el agua se ha destinado principalmente a las actividades agropecuarias y a la construcción de infraestructuras hidráulicas. Por lo que es importante evaluar el riesgo ambiental del agua para saber las repercusiones a futuro y priorizar la gestión integral de los recursos hídricos.

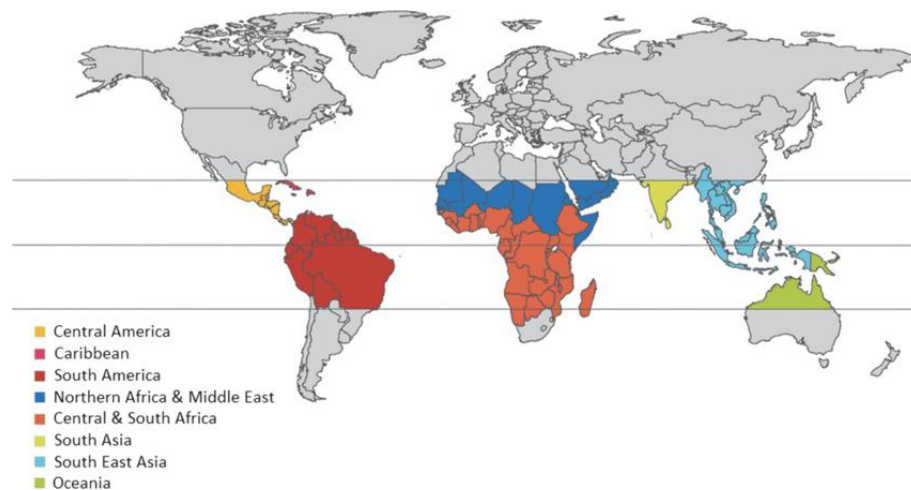
Un modelo de distribución espacial es un componente de base tecnológica-científica que se implementa utilizando herramientas metodológicas como la cartográfica, sistematización matricial, aplicación de estadística, percepción remota y ecuaciones con diversas variables que explican una problemática (Buzai y Baxendale, 2010). Dentro de las técnicas que integran el modelo de este trabajo de investigación, se realizará el cálculo del índice de riesgo ambiental del agua. De forma que la implementación del índice del riesgo del agua en un modelo de distribución espacial es un tema de vanguardia. Di, Liu, Zhang, Tong, Ji (2018), implementaron un modelo similar en la cuenca del río Yinma en China basándose en indicadores y estudios previamente realizados en la región. Para ellos, el riesgo ambiental del agua se entiende como la probabilidad de que ocurran eventos y actividades que puedan dañar el ambiente del agua, ya sea por causas antropogénicas o procesos naturales. De modo que en la metodología generaron un modelo que evaluó los riesgos ambientales del agua según: el peligro, exposición, vulnerabilidad y la capacidad

de gestión regional. Se desarrollaron mapas de riesgo del año 2000 al 2015 para medir la variación del riesgo ambiental del agua, y como resultado el método les proporcionó información para la toma de decisiones en la gestión del agua.

## ESTADO DEL ARTE SOBRE LA TEMÁTICA DE ESTUDIO

### 1.1. Recursos hídricos en zonas tropicales

Las zonas tropicales están ubicadas en el austral equidistantes del ecuador, situados a 23° 27' de latitud norte y sur respectivamente, correspondiente al trópico de capricornio y trópico de cáncer (Balek, 1983). Por esta razón, las cuencas hidrográficas tropicales presentan altas precipitaciones, temperaturas cálidas y estaciones poco marcadas que permiten el crecimiento de la vegetación durante todo el año, ya que las condiciones ambientales son estables, mostrando mejores oportunidades para alcanzar el éxito ecológico (Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO, 1986).



*Figura 1. Ubicación de los trópicos*

Los ecosistemas tropicales son núcleos de biodiversidad del planeta, además, aportan diversos servicios ambientales, tales como: alimentación, suelos productivos, infiltración de agua de lluvia

a los mantos acuíferos, suministro de agua, dominio del ciclo hidrológico y son importantes reguladores de la variabilidad climática (Lewis, 2006).

Según Toledo (2002), son cinco las grandes cuencas: Amazonas, Ganges-Bramaputra, Congo, Yantzé y Orinoco. Estas cuencas de agua dulce se ubican en la región tropical, las cuales cuentan con un flujo superior a los 100 km<sup>3</sup> por año.

Esta importante acumulación de agua se da gracias al rol que desempeñan los bosques tropicales, en los cuales se intensifican la lluvia por lo que aportan en la cantidad de agua disponible y regulan el flujo de las aguas de superficie y subterráneas (Ellison, et al., 2017). Una gran parte de la población mundial se abastece de agua potable que proviene de zonas boscosas, por ser agua dulce de buena calidad, esto se observa en la mayoría de las capitales de países latinoamericanos (Bogotá, México, Quito, San José, Managua) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, 2013).

Otros beneficios de la relación intrínseca bosque-agua son los filtros naturales que conservan la calidad del agua, además de que contribuyen a la reducción de riesgos relacionados con el agua como deslaves, inundaciones, sequías que, a su vez, evitan la desertificación y la salinización (Organización de las Naciones Unidas, (ONU), 2018).

México es poseedor de 31 millones de hectáreas de este tipo de bosques, las cuales se distribuyen casi exclusivamente en la vertiente del Atlántico, que abarca el sur del estado de San Luis Potosí, Veracruz, Tabasco y el sur de la península de Yucatán. Además, se encuentra en terrenos por debajo de los 1,200 metros sobre el nivel del mar (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2017).

En San Luis Potosí se ubica la zona tropical de la Huasteca Potosina. Su ubicación es beneficiada por las masas de aire húmedo que se desplazan del Golfo de México, cuenta con ecosistemas de bosque tropical húmedo y bosque mesófilo, lo que permite que converjan un sinnúmero de redes fluviales que propician cascadas imponentes (Lárraga, 2014) que brindan la sensación de recursos hídricos en abundancia e infinitos.



## 1.2. Crisis del agua y las regiones tropicales

En 1994 se introdujo el término de seguridad humana, el cual pretendía incluir la seguridad nacional- proteger a las naciones de amenazas militares, geográficas y sociales- y la seguridad de la vida de las personas (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2006). Al ampliar el término de seguridad humana se debe tener en cuenta que la seguridad del agua es un eje integral de este concepto.

La seguridad impulsa a que las personas puedan acceder a un agua de cantidad suficiente, calidad inocua, accesible física y económicamente para lograr una vida saludable, digna y productiva, al mismo tiempo que se mantienen los sistemas ecológicos que proporcionan agua y también dependen del agua.

La Asamblea de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce en el 2010 que el derecho a agua y saneamiento es básico para la calidad de vida y la aplicación de todos los derechos humanos. En esta resolución se deja claro que la responsabilidad de cumplir este derecho la tienen los Estados, los cuales tenían la tarea de reducir a la mitad para 2015, el porcentaje de personas que carezcan de acceso a agua potable o no puedan costearlo.

El acceso a agua potable es una condición previa fundamental para el goce de varios otros derechos humanos, como los derechos a la educación, la vivienda, la salud, la vida, el trabajo y la protección contra tratos o penas crueles, inhumanos o degradantes.

El derecho al agua según la ONU (2011) debe implicar que el agua debe ser de cantidad, calidad, físicamente accesible y asequible.

- Cantidad: Se refiere a que el suministro de agua por persona debe ser suficiente y continuo para el uso personal y doméstico.
- Calidad: El agua debe ser incolora, inodora y sabor aceptable. También debe estar libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que constituyan una amenaza para la salud humana. Esto aplica a fuentes destinadas a consumo humano tales como corrientes de agua, agua embotellada, agua en cisterna y pozos.

- Físicamente accesible. Según la OMS (2003) la fuente de agua para un acceso básico debe encontrarse máximo a 1000 metros o 20 minutos de tiempo total de recolección. Se debe considerar que la fuente esté al alcance de todos los sectores de la población. El acceso a 20-25 litros por persona al día representa el mínimo, pero no garantiza las medidas sanitarias.
- Asequible. El costo del servicio del agua debe estar al alcance de las necesidades del hogar, para impedir que corten el acceso/servicio por no poder pagarla (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2014).

Según la Organización Mundial de la Salud (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2011) el derecho al agua conlleva a los Estados a tres obligaciones que se dividen en: la obligación de respetar y de proteger. Esto se resume en que los gobernantes no deben obstaculizar el derecho al agua, más bien deben proteger a través de la legislación u otras medidas (administrativas o financieras) a todos los ciudadanos, especialmente a las poblaciones más vulnerables en el abastecimiento de agua potable y saneamiento.

Si bien es necesario reconocer el derecho al agua, este decreto salió a luz con muchos años de atraso. La crisis del agua no logró atraer la atención mundial a tiempo, ya que los gobernantes intentaban resolver otras crisis, como la deuda externa o crisis ambientales sin un eje hídrico.

Una de las principales problemáticas de la actualidad es el abastecimiento de agua para la población mundial que va en aumento (Biswas, 1996). El suministro de agua debe satisfacer las demandas para consumo humano, agrícola e industrial, sin embargo, los incrementos en la población y los cambios en el estilo de vida afectan negativamente a los recursos hídricos.

Según las Naciones Unidas en su reporte de agua y saneamiento (2018), el agua dulce que hay en el planeta es suficiente para sostener la vida humana, pero el principal problema es que la distribución no es la correcta, lo cual provoca escasez crónica de agua dulce.

Datos de la Organización Mundial de la Salud (2017) sobre la situación global de la carencia de recursos hídricos, revelan que 4 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros y a su vez, 1700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales en las que

el consumo de agua supera la recarga. Esto conlleva a grandes desigualdades, sequías, y recrudescimiento del hambre y la desnutrición.

Estas cifras se ven desalentadoras, ya que han pasado siglos de desigualdad en el uso de los recursos hídricos. Esta diferencia puede ser social, geográfica o económica, lo cierto es que la crisis del agua tiene diversas causas y consecuencias negativas.

La distribución del agua en la Tierra ocurre naturalmente y por tanto no guarda relación con la ubicación de las poblaciones humanas, ni con las fronteras establecidas por los seres humanos. Esta distribución es geográficamente desigual, e inciden factores temporales como las estaciones, y algunos eventos climatológicos.

Existe una escasez física del agua, dada porque ésta es insuficiente para satisfacer las demandas, tanto por su distribución, como por factores humanos asociados a su sobreconsumo y la degradación de la calidad.

Paradójicamente, las zonas tropicales donde aparentemente abundan los recursos hídricos enfrentan la crisis de escasez económica del agua, asociada a la carencia de inversiones e infraestructura y la falta de una gestión adecuada para satisfacer las necesidades de las personas con menores medios financieros (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO), 2013). Los países que conforman estas regiones están atrapados, sin poder avanzar en el proceso de desarrollo económico. Por lo cual, existe un contraste real entre zonas templadas (con países “ricos”) y zonas tropicales (“pobres”) (Kamarck, 1978).

Los trópicos se enfrentan a diversos desafíos que requieren una atención especial, como el cambio climático, la deforestación de bosques tropicales, el avance de las zonas ganaderas, la explotación maderera, la urbanización y los cambios demográficos (Naciones Unidas, ONU, 2016).

Según la ONU (2019) en América Latina y el Caribe cientos de personas sin acceso a servicios de agua potable y saneamiento se concentran en áreas periurbanas, principalmente en los cinturones de pobreza que surgen en la periferia de muchas de las ciudades de la región.

Los gobernantes aun no consideran el desarrollo sostenible y permiten actividades como: seguir contaminando los recursos hídricos, recortes arbitrarios e ilegales de los servicios de agua, reducir el suministro de agua potable a los asentamientos precarios para satisfacer la demanda de las zonas

más ricas; agotar los recursos de agua que los pueblos indígenas utilizan para beber; educación inapropiada o inexistente sobre el uso correcto del agua y los servicios de saneamiento; la protección de las fuentes de agua y los métodos para reducir al mínimo el desperdicio; falta de legislación hídrica o incumplimiento.

En la figura 2 se observa la escasez física y/o económica del agua, en ella se aprecia que en la zona tropical se encuentran los países que enfrentan escasez económica del agua. Lamentablemente, la crisis del agua en los países africanos está afectando a casi todo el continente.

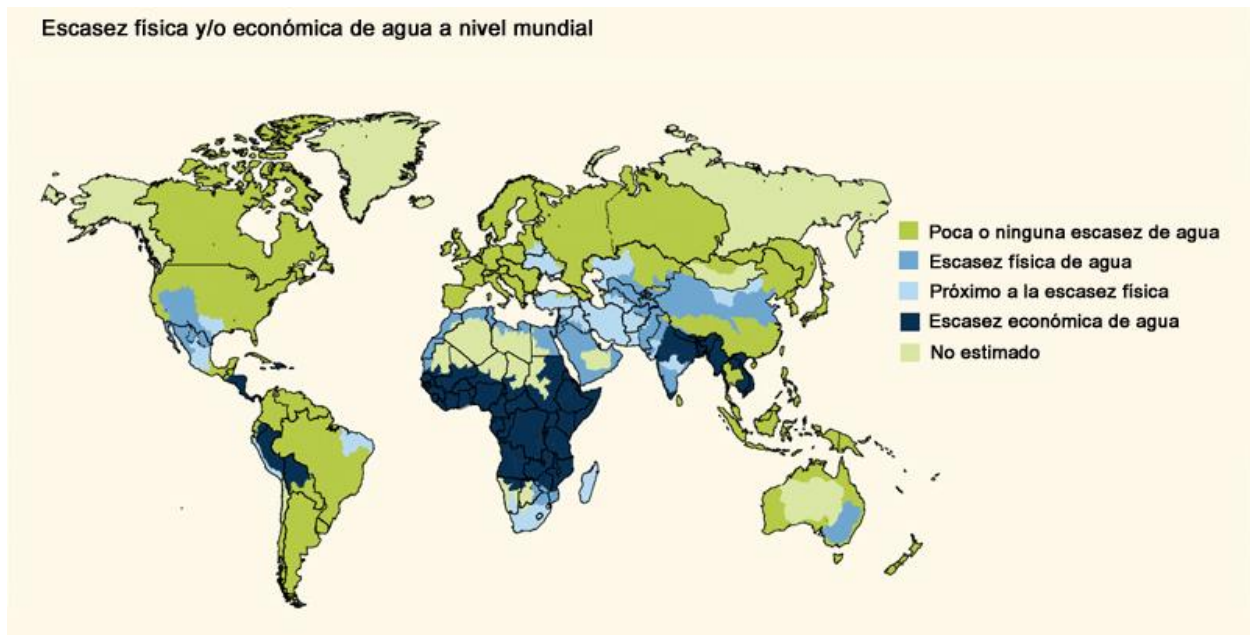


Figura 2. Escasez física y/o económica del agua

Igualmente, Lawrence, Meigh et Sullivan (2002) realizaron una comparación con 147 países del índice de pobreza del agua (IPA) desarrollado en el Centro de Ecología e Hidrología (CEH), en Wallingford, Reino Unido-. El propósito fue expresar una medida interdisciplinaria que vincula el bienestar de los hogares, con la disponibilidad de agua e indicar el grado en que la escasez de agua impacta en las poblaciones humanas con una ponderación de 0 a 100. Los componentes del índice son:

- Recursos
- Acceso

- Capacidad
- Uso
- Medio ambiente

Con la información obtenida, se mostró que la mayoría de los países de la mitad superior son desarrollados o en desarrollo más ricos, dejando en evidencia la falta de agua no física en las zonas tropicales. En este caso México como país tuvo un puntaje de 59.

En el 2015 (López, Santacruz, Ramos, y Morán) se aplicó el mismo índice en la Huasteca Potosina (donde termina la zona tropical mexicana) el puntaje obtenido fue de 59, la zona cuenta con abundantes recursos hídricos, con ríos, manantiales, cascadas y el agua superficial es la principal fuente de abastecimiento, pero se obtuvo un puntaje intermedio por no cumplir con el resto de los componentes.

### **1.3. Riesgo del agua**

La concepción del riesgo es algo con lo que ha convivido el ser humano generaciones tras generaciones. En un principio solamente se enfrentaba a riesgos naturales, actualmente también debe afrontar los riesgos que provoca la industrialización, el crecimiento de la población, la escasez de recursos entre otros (Echemendía, 2011).

En el artículo “El concepto del riesgo” de Chávez (2018), se da un recorrido histórico de la evolución del riesgo, desde lo divino hasta los cálculos de probabilidades que se realizan en la bolsa de valores. En la revisión bibliográfica se observa que el gobierno de España define el riesgo como: “la probabilidad de que se produzca un efecto específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas” (Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, Gobierno de España, 2015).

Las ciencias que se ven involucradas con el manejo del riesgo han adaptado el concepto según su campo de aplicación.

El Ministerio de Ambiente de Perú define riesgo ambiental como:

“La probabilidad de ocurrencia que un peligro afecte directa o indirectamente al ambiente y a su biodiversidad, en un lugar y tiempo determinado, el cual puede ser de origen natural o antropogénico” (Ministro de Ambiente Perú, 2010).

En la actualidad los cambios que han transformado los ecosistemas y los paisajes han traído nuevos riesgos, como es el caso del riesgo del agua, que ya no se puede generalizar o incluir dentro de los riesgos ambientales por los impactos negativos que conlleva no darle un lugar propio.

La competencia por el recurso disponible está en aumento, lo que provoca una necesidad mayor de proteger la calidad y cantidad del agua. Se debe tener en cuenta que este riesgo estará determinado por las circunstancias o condiciones de cada entorno (Hall y Borgomeo, 2013). Los gobernantes, las industrias y nuevos inversionistas deben considerarlo para la planeación y toma de decisión, ya que las consecuencias pueden ser graves, incluso en las zonas tropicales.

La falta de seguridad hídrica se convierte en un riesgo del agua, ya se puede observar la pérdida de biodiversidad de agua dulce, por la extracción excesiva de agua, o por la contaminación de ríos, lagos y aguas subterráneas y por una infraestructura hídrica mal planificada (World Wide Fund, (WWF), 2009).

Por otro lado, se encuentran los riesgos por la escasez de agua, los cuales deben involucrar a los responsables y a los afectados por dicho riesgo.

Los riesgos asociados a la escasez de agua se pueden clasificar de la siguiente manera (WWF, 2010):

- Riesgo por insuficiencia de recursos hídricos para satisfacer las necesidades básicas de las personas, el medio ambiente y las empresas.
- Riesgo de las consecuencias de recursos hídricos insuficientes, como precios más altos de la energía, pérdida de ventaja competitiva, inestabilidad política y económica, migración de la población o pérdida de oportunidades económicas, por nombrar algunos.

- Riesgo de gestión no eficaz y falta de mitigación del agua tomadas por los gobernantes y empresarios. Las decisiones políticas o económicas no dan prioridad a largo plazo al acceso.

En consecuencia, en cualquier análisis de riesgo que involucre al agua, es necesario establecer quién está en riesgo, ya que se difiere entre individuos y entre sectores económicos, por lo tanto, ciertos grupos de personas y de recursos hídricos serán más vulnerables que otros.

Asimismo, se debe cuestionar riesgo a qué, ya que la escasez de agua es subjetiva. Por ejemplo, una buena lluvia puede ser beneficiosa al agricultor, pero perjudicial para las personas que viven en domicilios precarios a la ribera de un río (World Wide Fund, (WWF), 2009).

El riesgo del agua es multidimensional, aunque se ha enfocado a la seguridad hídrica y en la disponibilidad, ya que genera una competencia entre agricultura, pobladores urbanos y rurales, ecología e industria.

El impacto potencial de los eventos relacionados al agua está presente en todos los sectores, pero algunas empresas están más expuestas financieramente a estos riesgos que otras, ya sea por su rubro, estrategias de geografía, exposición y mitigación (Bonnafoos, Lall, y Siegel, 2017).

Para frenar el riesgo del agua y disminuir la incertidumbre que genera, se ha desarrollado el índice del riesgo del agua. Es claro que las sequías o inundaciones pueden alterar las ganancias de los negocios. Al igual que los inversionistas, los gobernantes emplean el índice para tener un comportamiento claro del agua en las regiones o países y conocer la pérdida que traería a un estado o municipio una sequía prolongada. El índice del riesgo del agua se considera como una nueva referencia, que se ha implementado para informar de manera financiera a los propietarios de activos y administradores de inversiones, pero también se aplica para que gobernantes integren el agua en la toma de decisiones. El índice traduce las métricas clave del riesgo hídrico en medidas financieras que pueden incorporarse de manera precisa y eficaz en los modelos financieros (Schumann, 2018).

El cálculo del índice se puede complementar con información espacial que permite integrar mejor la información y visualizar las áreas de mayor preocupación en cuanto al riesgo del agua a través de la generación de mapas de riesgos.

En este caso, el propósito de los mapas de riesgos del agua es tener información detallada de las actividades que ponen en peligro, exposición o vulnerabilidad al agua.

Los encargados de los países del trópico deben recurrir a nuevos enfoques y adaptar nuevas formas para salvaguardar los recursos hídricos, sobre todo, porque el principal riesgo del agua en estas zonas es la mala gestión. Más sabiendo que las nuevas metrópolis estarán ubicadas en esta región, lo cual traerá serios problemas de alimentación, agua potable y tratamiento a aguas residuales (Water Center for the Humid Tropics of Latin America and the Caribbean, 1999).

#### **1.4. Vulnerabilidad social y agua**

La vulnerabilidad es un componente de la ecuación de riesgo que no se puede excluir. En algunas ocasiones este término se utiliza de manera inadecuada para referirse a pobreza, marginación y exclusión (Sánchez y Egea, 2011).

La vulnerabilidad es un tema complejo y multidisciplinario que se ha estudiado en las últimas décadas, de la cual se han obtenido varios conceptos.

Las vulnerabilidades son la incapacidad de resistencia y la dificultad de recuperación y reconstrucción autónoma de los elementos afectados. Según Ruiz (2012), tiene relación con algún tipo de amenaza, sean eventos de origen natural como sequías, terremotos, deslizos o inundaciones, o amenazas antropogénicas como contaminación, accidentes, hambrunas o pérdida del empleo y la relación con las características internas de los elementos expuestos.

Según el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2015), para establecer el concepto de vulnerabilidad social, primero se debe analizar desde la disciplina de humanidades (la sociología, economía, ciencias políticas, geografía y antropología), y así obtener nuevas perspectivas de las causas y síntomas de las consecuencias sociales de los desastres. Por consiguiente, se habla expresamente de los factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos.

Los impactos provocados por el desarrollo económico vigente exponen la inhabilidad, imposibilidad o incompetencia de los grupos más débiles de la sociedad (Pizarro, 2001) de responder de manera positiva y ventajosa a los procesos sociales. Alejando pensamientos obsoletos



de economía e integrando el desarrollo sostenible a la reducción de la vulnerabilidad es como se podrán minimizar dichos impactos.

Otra preocupación por políticas que surgen de este sistema erróneo es la vulnerabilidad social ante la escasez física o la mala distribución del agua.

La vulnerabilidad relacionada con el uso del agua también es una preocupación mundial, relacionados con el cambio climático, la pobreza y los peligros naturales (Downing, 2005). Implementar infraestructuras del agua planeadas y habilitadas para cada zona, tiene un efecto muy importante en la reducción de vulnerabilidad y la capacidad de los hogares para absorber catástrofes (Watkins, 2006).

La mala gestión de los gobernantes perpetúa la vulnerabilidad social al permitir acciones como eliminar la cobertura boscosa, cambiando el uso de suelo por monocultivo, el deterioro de la calidad de agua por contaminación, concesiones en lugares donde se encuentran reservas hídricas, por nombrar algunos ejemplos, todo esto sin implementar instrumentos de protección ambiental y civil (Cano, 2014).

Por lo tanto, se puede decir que los problemas hídricos actuales conllevan a la vulnerabilidad del recurso (cantidad y calidad no adecuada) y exponen la vulnerabilidad social, es decir agua escasa, insalubre, o contaminada mayormente a las poblaciones ya vulnerables en sí (con malnutrición y escasos medios de vida) (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2015).

Ávila (2008), propone la definición de vulnerabilidad socioambiental como un proceso de situaciones “críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad de los recursos hídricos que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas”. La interacción del ser humano con los problemas ambientales del agua condiciona el desarrollo social, económico y ecológico, por lo tanto, limita la calidad de vida.

La vulnerabilidad socioambiental puede utilizarse como un indicador de seguridad hídrica para mejorar la gestión del recurso. Este puede ser expresado espacialmente en mapas de vulnerabilidad hídrica, ya sea por desabasto, acotamiento de mantos acuíferos o falta de infraestructura.

Un indicador a nivel país o municipio, destacando la relevancia de la vulnerabilidad socioambiental y prioridades políticas de cada país puede garantizar:

- a) Agua necesaria para el funcionamiento de los ecosistemas
- b) Seguridad alimentaria
- c) Cobertura de las necesidades básicas de la población
- d) Gestión de los conflictos y disputas por el agua
- e) Prevención a desastres asociados con el agua (Ávila, 2008).

### **1.5. Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en las regiones tropicales.**

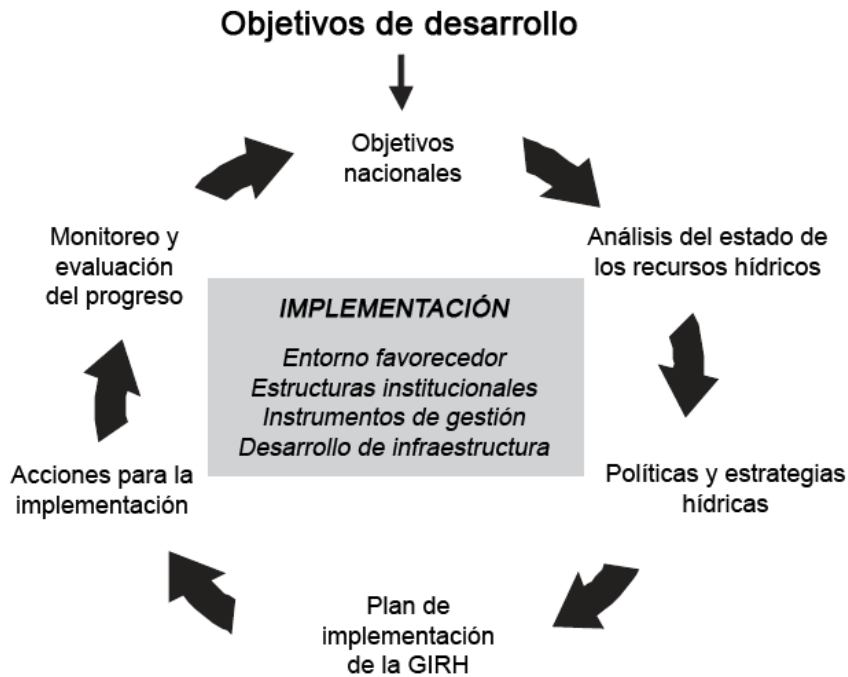
Los Estados han de tomar decisiones complicadas sobre la asignación del agua para minimizar la crisis de ésta. El enfoque de mitigación y el fragmentado no dan los resultados esperados, por lo tanto, es importante un enfoque global para la gestión del agua.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como un concepto empírico construido por la experiencia de los profesionales (Organización de las Naciones Unidas, 2014). En la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible (CMDS) en 1992 en Río de Janeiro, se discutió el significado en la práctica, ahora el concepto ha sido adoptado ampliamente por los administradores del agua, tomadores de decisiones y políticos de todo el mundo.

Según Martínez (Martínez-Austria, 2013), la GIRH es una forma de avanzar hacia un desarrollo y gestión eficientes, equitativos y sostenibles de los recursos hídricos, ya que integra las necesidades de uso de agua para todos los sectores económicos y medioambientales dentro de la planificación hidrológica, en vez de considerar cada demanda de forma aislada.

El objetivo 6 del Desarrollo Sostenible (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2013) plantea: Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Se pretende que para el 2030 todos los países pongan en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluyendo el apoyo y fortalecimiento de la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.

Bajo este compromiso, los países deben promover legislaciones y proyectos de gestión hídrica para maximizar la economía y el bienestar social.



*Figura 3: Fases de la planificación e implementación de GIRH, ONU 2014*

La población en general debe cambiar la forma de utilizar los recursos hídricos para lograr reformas del agua y así poder disminuir la crisis de la misma.

GIRH tiene muchos desafíos, algunos están relacionados con la integración, cuya principal pregunta es “cómo lograrla”, debido a que los recursos hídricos son utilizados por todos los sectores y muchas instituciones. Idealmente, todos los aspectos deben ser considerados e integrados. La coordinación es clave, siendo ésta uno de los primeros pasos que deben tomarse en cuenta, sin embargo, las necesidades, la financiación, los recursos, capacidad humana, barreras institucionales y muchos otros factores son condiciones del mundo real en oposición a un universo de gestión teórica (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2014).

Estos factores establecen los límites operativos y determinan hasta qué punto se puede llevar a cabo la integración. Los tomadores de decisiones (gobiernos, empresas privadas, ONG’s) tienen que priorizar que los aspectos importantes se incluyan en las evaluaciones, planes de manejo o en procesos de desarrollo.

No obstante, los especialistas en recursos hídricos no deben olvidarse de los verdaderos fines u objetivos de la gestión del agua, que son: la reducción de la pobreza, la redistribución de los ingresos a nivel regional y la conservación del medio ambiente (Martínez-Austria, 2013).

La GWP Centroamérica y África tropical (regiones con abundante agua, pero con problemas de escasez por mala gestión) plantea en sus informes Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal (2013) y Gestión de los recursos hídricos en África (2012) una serie de componentes para establecer una correcta gestión del agua. Entre estos componentes se encuentra:

- La identificación de los sectores usuarios y actores estratégicos
- Políticas que regulen el uso y distribución del agua
- Emplear y acatar una estructura organizativa
- Planeación de los recursos hídricos
- Inclusión y reconocimiento de la mujer en la gestión.

Es desalentador reconocer que las zonas terrestres donde los recursos son abundantes, realmente la población carece de agua, debido a que los gobernantes no priorizan las necesidades de la población dentro de las cuencas hídricas, sino que priorizan sus propias necesidades.

En el caso particular de la cuenca del Río Gallinas, motivo de este análisis, en recientes fechas se han reportado ríos perennes secos en época de verano y los manantiales se han reducido para el abastecimiento de agua potable y riego. Esto también afecta al sector turístico que se está convirtiendo en un pilar para la economía de la cuenca.

El Río Gallinas recibe afluentes del río Tamasopo, el cual presenta contaminación por aguas residuales de los drenajes de la cabecera municipal y del ingenio cercano, según han indicado las denuncias de la población. A su vez, la planta de tratamiento ubicada en Agua Buena no está funcionando, lo que ocasiona un riesgo sanitario a los ríos y a la población.

El deterioro de los cuerpos de agua conlleva a una pérdida económica a los sectores agrícola y turismo. A su vez, el crecimiento insostenible de estos dos sectores ocasiona un riesgo a los recursos hídricos de la cuenca.

## **HIPÓTESIS**

El modelo de distribución espacio-temporal permite evaluar los factores de riesgo ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas en los últimos 30 años, y aportar información relevante para la futura toma de decisiones en la gestión integral hídrica.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el riesgo ambiental del agua en la subcuenca del Río Gallinas a través de un modelo de distribución espacio-temporal.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las variables de los componentes del riesgo ambiental del agua, a través de una matriz de evaluación de riesgo.
- Estimar el índice de riesgo ambiental del agua, por medio de tecnologías espaciales para la gestión hídrica.
- Desarrollar un modelo espacial a través del análisis de variables y proceso geoestadístico, para escenarios que favorezcan la toma de decisiones.

## **METODOLOGÍA**

Para el estudio del riesgo ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas se realizó un análisis de los últimos 30 años de las variables seleccionadas.

La metodología inició partiendo de la revisión de la problemática global y específica del área de estudio; luego se recopiló la información referente al estado del arte y a los datos de las instancias pertinentes (CONAGUA, CEA, COTAS, etc.) como: meteorológicos, climáticos, geográficos, hidrológicos, población, gastos de agua, área de cultivo, indicadores económicos, sociales y ambientales. Asimismo, para profundizar con la investigación se buscaron artículos referentes al riesgo ambiental del agua, modelación espacial, procedimiento jerárquico, entre otros.

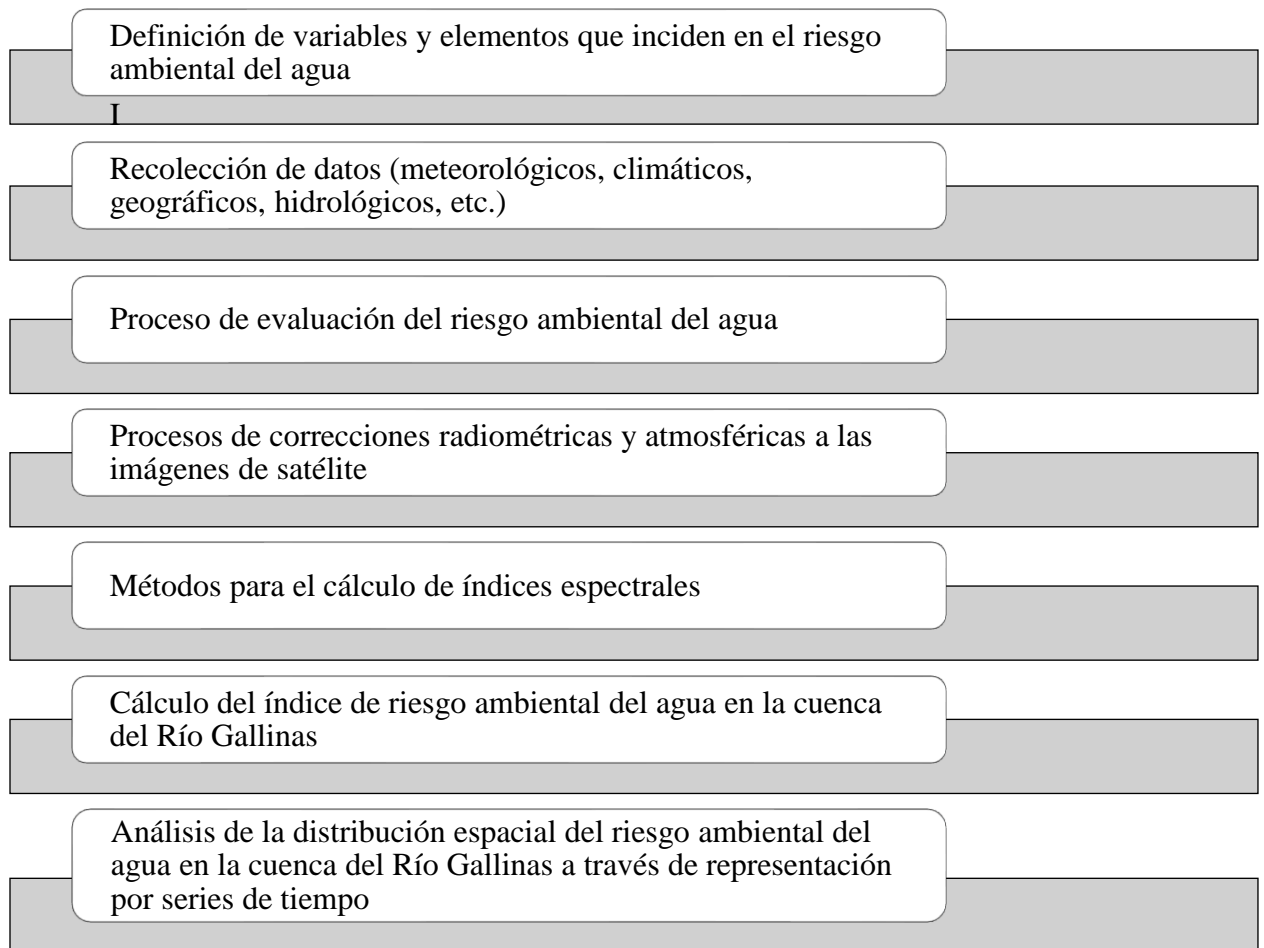
Los datos obtenidos se analizaron para realizar la matriz de evaluación de los riesgos ambientales presentes en la cuenca y así determinar los peligros, la exposición, reconocer quiénes son vulnerables y cómo se conlleva la gestión de los recursos hídricos.

Posteriormente, se obtuvieron datos de imágenes satelitales que muestran la variación de la cuenca en estos 30 años. Se descargaron imágenes con menor porcentaje de nubosidad de la época seca de los años 1990, 2000, 2010 y 2020, de los sensores Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS, con una resolución espacial de 30 metros. La información de estas imágenes permitió el cálculo de índices espectrales: Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI), índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), cálculo de la humedad, de evapotranspiración y de radiación solar de la zona de estudio, esto para analizar la dinámica de estas variables a través del tiempo.

Se analizó el valor del Producto Interno Bruto (PIB) para asociar el requerimiento hídrico de las actividades económicas que se desarrollan en la cuenca del Río Gallinas. Todos estos pasos se realizaron para ponderar las variables por medio del Proceso Analítico Jerárquico y asignarles un peso en ArcGis para el cálculo del índice de Riesgo Ambiental del Agua (WERI) que se ve reflejado en un algebra de mapas temáticos que describen las zonas dentro de la cuenca que presentan riesgo ambiental del agua.

Por último, se empleó series de tiempo determinada, para representar los riesgos en los próximos 5, 10 y 15 años próximos.

La figura 4 muestra de manera general, el flujo de la metodología a seguir en el presente estudio.



*Figura 4. Diagrama general de metodología*

# **CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO Y VARIABLES QUE INCIDEN EN EL RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA.**

## **1.1. Área de estudio**

### **1.1.1. Ubicación geográfica**

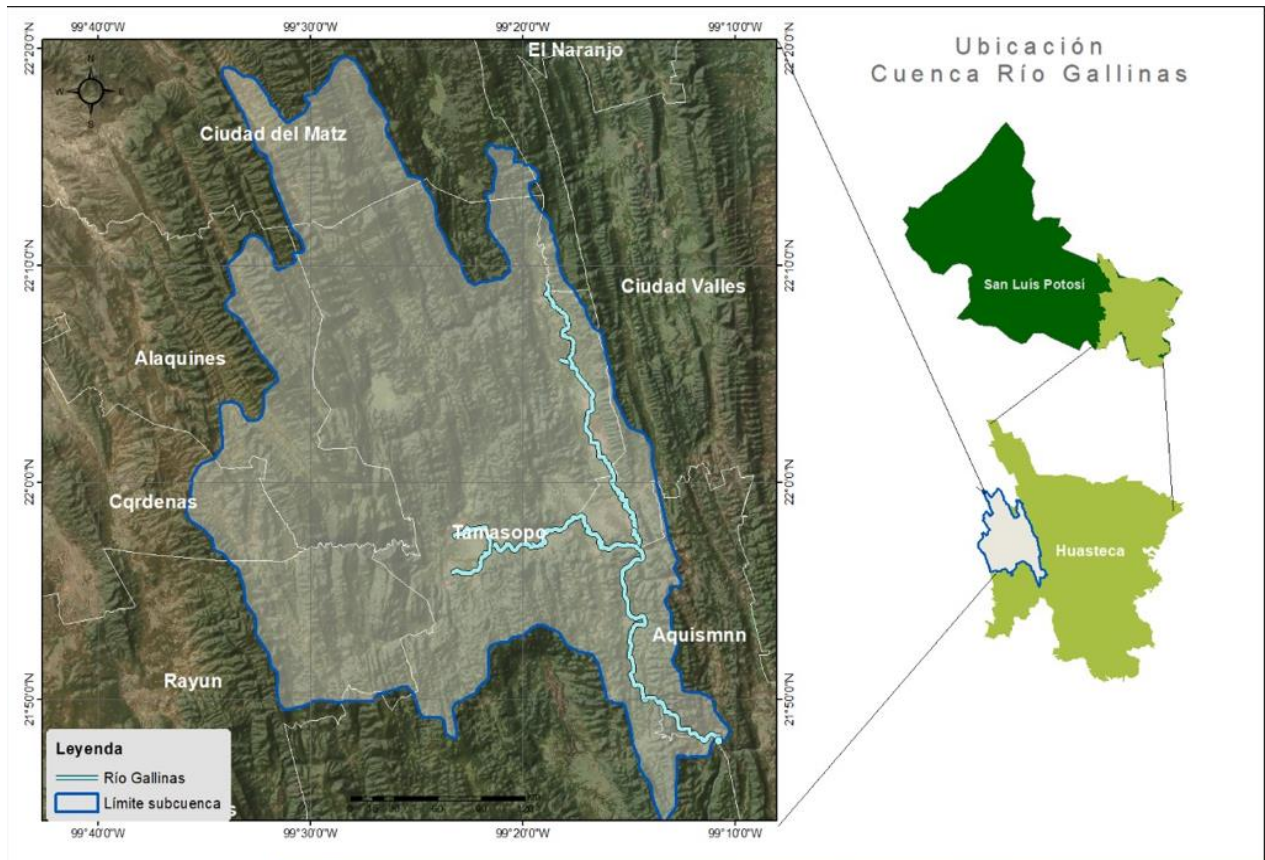
La Huasteca Potosina junto con las zonas Centro, Media y Altiplano conforman los cuatro espacios territoriales en los que se divide el estado de San Luis Potosí. Comprende parte de la planicie costera del golfo de México y una porción de la Sierra Madre Oriental. Ocupa una superficie de 11,343 km<sup>2</sup>, que representa del 18.0% de la superficie total del estado. Aporta el 13.6% del PIB estatal y aloja al 28.7% de la población de la entidad. La temperatura media anual varía de 19°C a 25°C y el mes más caluroso suele ser mayo con temperaturas de 27°C hasta los 35°C y el mes más frío, enero con 16°C. (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2012). La región está compuesta por veinte municipios: Aquismón, Axtla de Terrazas, Ciudad Valles, Coxcatlán, Ébano, El Naranjo Huehuetlán, Matlapa, San Antonio, San Martín, Chalchicuatla, San Vicente Tancuayalab, Tamasopo, Tamazunchale, Tampacán, Tampamolón Corona, Tamuín, Tancanhuitz, Tanlajás, Tanquián de Escobedo y Xilitla (Aguiles, 2008).

La actividad agrícola que se presenta por los climas cálidos húmedos y subhúmedos, son los cultivos de maíz, cártamo, frijol, cebada, caña de azúcar, naranja, café, limón agrio, tuna y mango (Secretaría de Desarrollo Urbano, Comunicación y Obras Públicas, 2000). La ganadería y el turismo también son actividades importantes.

La cuenca del Río Gallinas comprende los municipios de: Alaquines, Aquismón, Cárdenas, Ciudad Maíz, Ciudad Valles, El Naranjo, Rayón y Tamasopo.

La principal actividad que destaca es la agricultura, siendo la caña de azúcar el cultivo central. Los cañaverales se ubican en la ribera de los ríos Tamasopo y Río Gallinas. Tamasopo es el municipio de mayor extensión dentro de la subcuenca. Otras actividades son la ganadería y el turismo.





*Figura 5. Ubicación Cuenca del Río Gallinas*

### 1.1.2. Hidrografía

La cuenca se ubica en la región hidrológica 26 Pánuco RH-26, la cual comprende el 45.60% del territorio del Estado (SEMARNAT, 2018) y se divide en Alto y Bajo Pánuco. Esta segunda parte abarca al estado de San Luis Potosí, dentro de ella se extiende la mayor red fluvial que proporciona afluentes de gran importancia al río Pánuco. En el estado, la región hidrológica se divide en cuatro cuencas: Río Tamuín, Río Moctezuma, Río Pánuco y Río Tamesi (INEGI, 1985).

El área de estudio es la subcuenca Río Gallinas la cual pertenece a la cuenca del río Tamuín.

El Río Gallinas tiene un área de 797.9 km<sup>2</sup>, una longitud de 105,225.30 metros con una en cota topográfica de 1,612.33 msnm (Cuevas, Almazán, y Benavides, 2019).

La parte alta de la cuenca del Río Gallinas se extiende sobre el límite sur de Ciudad Maíz en la localidad de Llanitos; en esta zona el río es conocido como río San Nicolás, luego se une en la cascada del Aguacate (localidad de Damián Carmona) con el río Frío, a lo largo de este trayecto se le conoce como Río Gallinas, el cual recibe afluentes del río Tamasopo y sigue el flujo hacia la cascada de Tamul. El río atraviesa principalmente el municipio de Tamasopo, los principales recursos hídricos de la cuenca son: Puente de Dios, cascadas de Tamasopo, Trampolín.

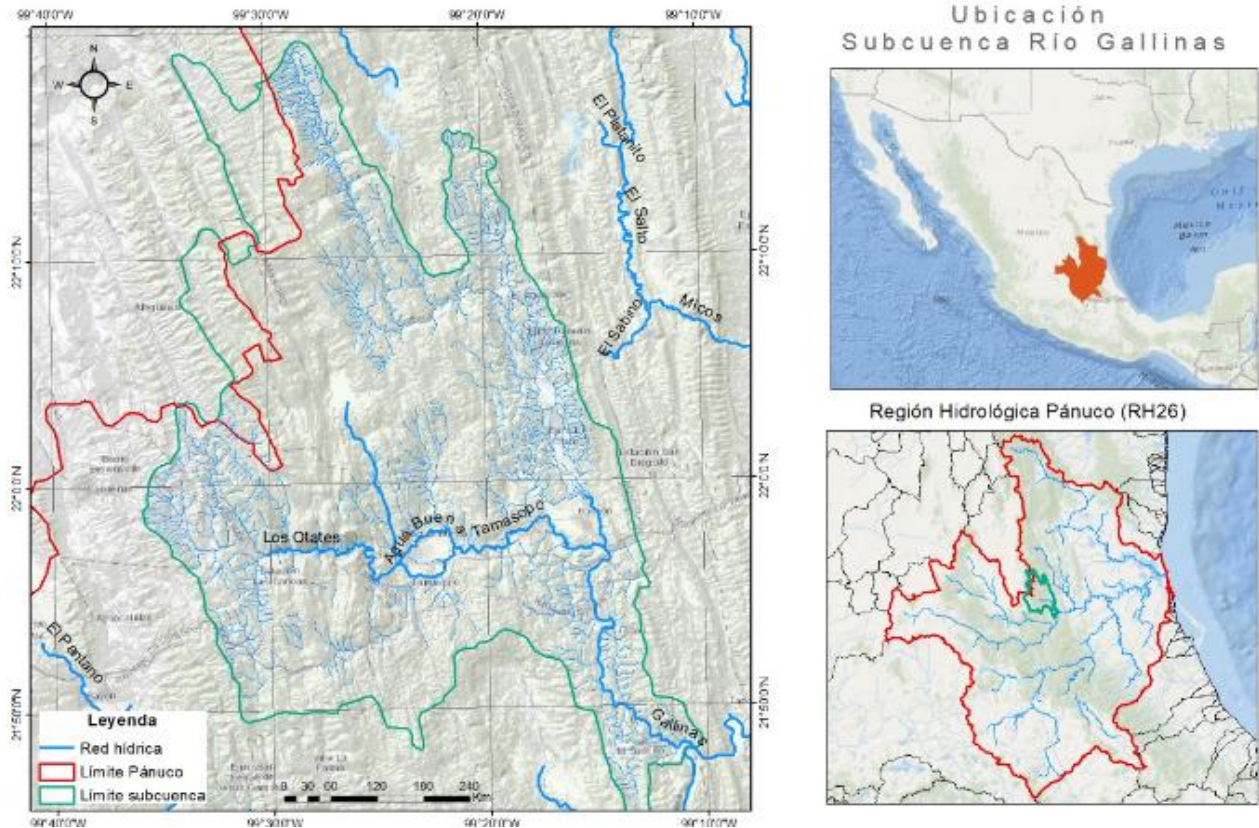


Figura 6. Ubicación hidrográfica de la cuenca del Río Gallinas

### 1.1.3. Clima

La información de los tipos de clima se obtuvo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). El mapa contiene los diferentes tipos de clima de la zona según la clasificación de Köppen modificada por García (1998), escala 1:1000000.

La clasificación del clima en la cuenca es la siguiente:

(A)C(w0) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T (relación precipitación y temperatura) menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

BS1hw Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

(A)C(m) Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

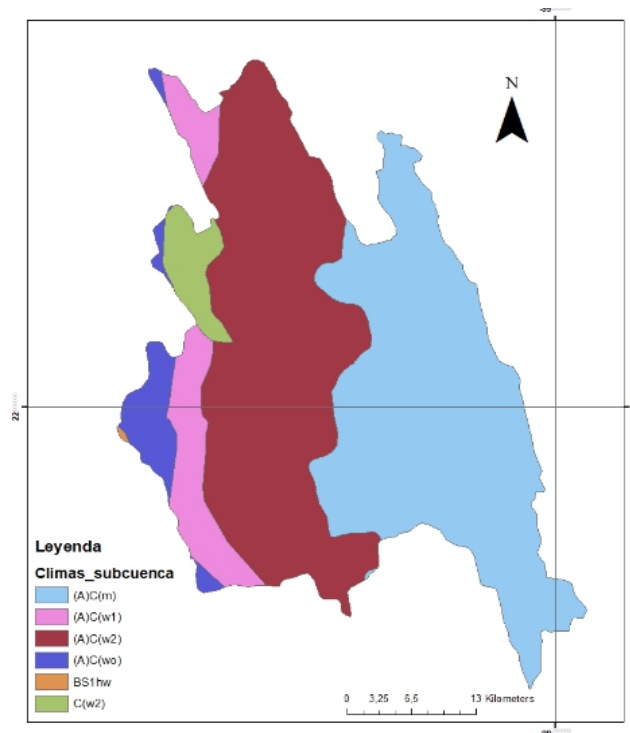
(A)C(w2) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

(A)C(w1) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.

C(w2) Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

(A)C(w1) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.



*Figura 7. Tipos de climas en la cuenca del Río Gallinas*

*Fuente: Elaboración propia con información de CONABIO*

#### **1.1.4. Tipos de suelo**

La edafología del lugar se obtuvo del geportal de CONABIO y el Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (2001) a una escala 1:1000000.

Regosoles: Son una agrupación de suelos que no han sido clasificados en Base Referencial Mundial del Recurso Suelo: Son suelos jóvenes y delgados. Se les encuentra en cualquier tipo de clima y generalmente en todas las alturas (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Se ubican en la zona noroeste de la subcuenca.

Cambisol cálcico: Son suelos con un ligero desarrollo en sus horizontes superficiales, por ser muy delgados se pueden presentar como suelos intermedios. También se observan acumulaciones de

arcilla, carbonato de calcio, hierro o magnesio (Gestión ambiental forestal e hidráulica, S.C., 2014).

Leptosoles: Son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados, ubicados principalmente en áreas muy erosionadas. Los leptosoles son los suelos que más predominan, ya que se les encuentran en los trópicos, en la tundra, montañas y llanos sobre el nivel del mar (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Se puede observar que es el tipo de suelo que domina la superficie de la subcuenca del Río Gallinas.

Litosoles: Son suelos muy rocosos y someros, esta clasificación pertenece al Mapa mundial de suelos FAO-UNESCO (1976). Los suelos redzinas son leptosoles sobre roca calcárea.

Luvisoles: Son suelos arcillosos en el subsuelo, se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados. Se encuentran en terrenos llanos o pocos pronunciados, donde se encuentren bien definidas la estación seca y húmeda (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Se consideran uno de los suelos más fértiles, su uso agrícola se enfoca en la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar (Palma-López, et al., 2017).

La subcategoría crómica se refiere al color pardo, rojizo o amarillento que presenta. Son de fertilidad moderada y con alta capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas (INEGI, 2004). Se encuentran en la zona norte de la cuenca.

Vertisoles: Según la base referencial mundial del recurso suelo (2007), se pueden encontrar cerca de lagos, ríos o zonas inundables, ya sea en climas tropicales, subtropicales, semiáridos, subhúmedos y húmedos con lluvias y sequías pronunciadas. Son suelos muy arcillosos que se expanden con la humedad y se contraen formando grietas con la sequía.

Son suelos fértiles utilizados en la agricultura, aunque en la estación seca presentan dificultades de laboreo por endurecimiento del perfil, y en época de lluvia se enfrentan con inundaciones por los que las raíces son débiles (Palma-López, et al., 2017). En la subcuenca del Río Gallinas se encuentran en la ribera del Río Gallinas y Tamasopo.

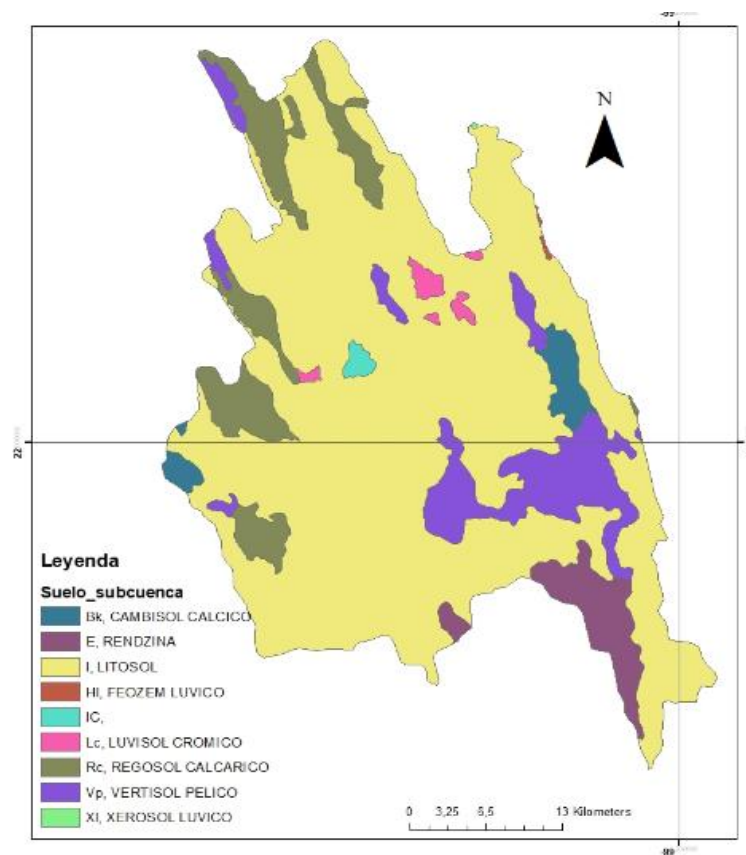
Los Phaeozem: Son suelos que se forman sobre material no consolidado. Son suelos viejos sin rocas, de color oscuro abundantes en materia orgánica. En agricultura son empleados para la

producción de granos y hortalizas, pero son muy sensible a las sequías periódicas y la erosión (Palma-López, et al., 2017).

En la subcuenca del Río Gallinas se ubica en pequeña porción cerca del Río Gallinas, donde predomina el cultivo de caña de azúcar.

Xerosoles: Normalmente debajo de la capa superficial se encuentra suelo arcilloso, por lo tanto, su uso agrícola depende de técnicas de riego. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. (INEGI, 2004). Estos suelos se desgastan o erosionan cuando están desprovistos de vegetación (Echavarría, Medina, Gutiérrez, y Serna, 2004).

En la Figura 8 se muestra la ubicación de los tipos de suelo en la cuenca del Río Gallinas



*Figura 8. Tipos de suelo en la cuenca del Río Gallinas*

*Fuente: Elaboración propia con información de CONABI*

## **1.2. Recolección de datos**

Se revisó y analizó información proveniente de las instancias que administran los recursos hídricos de la región, como las bases de datos de la Comisión Estatal del Agua (CEA), de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Geo-portal de CONABIO, los Comités de Cuencas de la Zona Huasteca e información proveniente de los gestores regionales de diversos ejidos. Asimismo, se obtuvieron datos de revistas científicas, documentos de la FAO, y tesis académicas que han estudiado la problemática de la zona.

Se recopiló información meteorológica, climática, geográfica, hidrológica, poblacional, económica y de gestión regional.

## **1.3. Indicadores económicos, ambientales, sociales y naturales**

Los indicadores revelan la situación de un aspecto que se desea medir para determinar si esa área está funcionando correctamente. Su propósito es poder cimentar y evaluar cualquier actividad de un país, empresa o proyecto.

Este acápite se enfocará en describir los indicadores económicos, sociales y ambientales que permiten caracterizar los usos y consumos del agua en la zona de estudio.

- **Indicadores económicos:** Presentan datos que revelan como ha cambiado la economía a lo largo del tiempo o en proporción del comportamiento de un país, población y Producto Interno Bruto (PIB) (Heath, 2012).
- **Indicadores sociales:** Se centran en medir las condiciones de bienestar en una sociedad, están estrechamente relacionados con la salud, educación, accesos a servicios básicos, como agua potable y servicio de alcantarillado. (Cecchini, 2005).
- **Indicadores ambientales:** Miden los cambios y presiones que ocurren en el medio ambiente y en los recursos naturales para atender su conservación, recuperación y uso sustentable (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, 2021).

#### 1.4. Indicadores de usos y consumos de agua en la zona de estudio

Los indicadores económicos, sociales y ambientales que se plantean en relación con el agua de la cuenca del Río Gallinas se muestran en la Tabla 2 son los siguientes (Comité de planeación para el desarrollo del Estado, 2015).

Tabla 2: Indicadores de usos y consumos de agua

OBJETIVO	INDICADOR
<b>A. Promover el manejo integral y sustentable del agua desde una perspectiva de cuencas.</b>	Volumen de sobreexplotación de acuíferos zona Huasteca (Disponibilidad de acuíferos)
	Porcentaje de ordenamientos para estudios técnicos para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en el largo plazo.
	Crear espacios de cultura del agua donde se fomenten las nuevas tendencias de sustentabilidad, logrando un mejor manejo de cuencas a través de la educación  Fortalecer los Consejos de Cuenca y Órganos Auxiliares para mejorar la eficiencia y eficacia
<b>B. Incrementar la capacidad de tratamiento de aguas residuales y promover su reúso</b>	Porcentaje del volumen de aguas tratadas colectadas  Porcentaje del volumen de aguas reutilizadas (respecto a aguas tratadas)
<b>C. Promover el desarrollo y difusión de tecnologías más efectivas y eficientes para la potabilización, uso y tratamiento del agua.</b>	Construcción de sistemas de captación pluvial  Fomentar la rehabilitación y construcción de plantas potabilizadoras



<b>D. Propiciar el uso eficiente del agua en las actividades agrícolas e industriales.</b>	Talleres, foros y ferias de difusión sobre el uso de tecnologías eficientes.
<b>A. Promover con los municipios la gestión de manejo y disposición de residuos sólidos urbanos, conforme a la normatividad vigente.</b>	Número de plantas de separación y tratamiento de residuos.

Nota: Esta tabla muestra los indicadores hídricos en los municipios que componen la cuenca del Río Gallinas, según el Programa sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

La tabla 2 se presenta para visualizar las mediciones y monitoreos que realiza el estado potosino a sus recursos hídricos. San Luis Potosí como estado y sus municipios al promover estos indicadores establece un compromiso en mitigar o minimizar ciertos peligros antropogénicos que fueron estudiados en la cuenca, si bien es cierto, estos indicadores ayudan a reducir una problemática que adolece de manera global, se pueden adquirir indicadores que sean menos genéricos y que conlleven una mayor responsabilidad para el sector agrícola y turismo.

Se puede observar que, aun cumpliendo con los objetivos del desarrollo sostenible, falta mucha conciencia para que el eje de recursos hídricos sea transversal en todos los sectores y actividades económicas.

### **1.5. Análisis del Producto Interno Bruto (PIB) sobre las actividades económicas de la zona de estudio.**

Se realizó una matriz de las actividades económicas que se realizan dentro de la cuenca, esta información se obtuvo del censo INEGI 2020. Estas actividades se dividen en tres categorías: (Tabla 3)

- Actividades primarias
- Actividades secundarias
- Actividades terciarias

Tabla 3: Actividades económicas en la cuenca del Río Gallinas

Actividades económicas en la cuenca del Río Gallinas		
Actividades primarias	Actividades secundarias	Actividades terciarias
Agricultura	Construcción	Comercio
Ganadería	Industria manufacturera	Transporte
Aprovechamiento forestal	Suministro de servicios básicos	Hoteles y restaurantes
		Servicios de salud
		Servicios profesionales
		Servicios financieros

A través del INEGI (2020) se obtuvo el Producto Interno Bruto (PIB), de las principales actividades de la cuenca del Río Gallinas, con el fin de analizar la distribución espacial de la economía de la zona, para reforzar la caracterización del área de estudio, ya que el desarrollo económico conlleva a un impacto ambiental del agua por estar implícita en cualquier actividad que se realice.

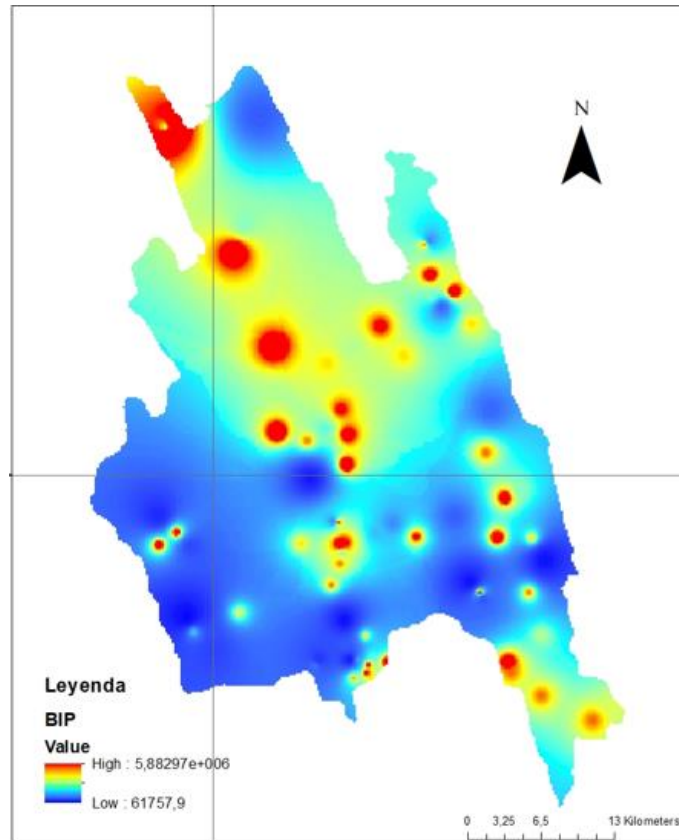
El mapa generado se obtuvo calculando el PIB de las actividades primarias, secundarias y terciarias.

Estos datos se clasificaron por actividad económica, es decir, las actividades primarias, secundarias y terciarias. Por medio de las cuales se calculó su distribución espacial mediante técnicas geoestadísticas (1990, 2000, 2010 y 2015). Finalmente, el mapa de distribución anual del PIB estatal se calcula mediante la suma de las tres clasificaciones por actividad económica:

Donde: PIB corresponde a la distribución espacial económica anual, *PIBpri* se refiere a la distribución espacial de las actividades primarias en el estado, *PIBsec* es la distribución espacial de las actividades secundarias en el estado y *PIBter* indica la distribución espacial de las actividades terciarias de San Luis Potosí.

Con la información general del PIB en el estado de San Luis Potosí se determinó el porcentaje que corresponde a la cuenca estudiada. Posteriormente se estudió la distribución espacial de las actividades con la siguiente ecuación:

$$PIB = PIBpri + PIBsec + PIBte$$



*Figura 9. Mapa del Producto Interno Bruto en la cuenca del Río Gallinas*

Al realizar el PIB se observa que las actividades económicas que rigen la dinámica de la cuenca son la agricultura, la ganadería, los hoteles y restaurantes.

### **1.6. Definición de factores y variables que inciden en el riesgo ambiental del agua**

Los factores que inciden en el riesgo ambiental del agua están relacionados a una serie de fenómenos naturales y antropogénicos.

Para la medición del riesgo y el impacto de éste se analizaron cuatro componentes:

- Peligro
- Vulnerabilidad
- Exposición
- Gestión

Se agrega el componente de gestión, ya que el agua es un eje integral que garantiza la sostenibilidad del recurso hídrico. Tomar en cuenta la gestión regional permite aterrizar el concepto de riesgo, que es tan complejo y amplio, a través de las lecciones, procesos y prácticas que ya se llevan en el lugar de estudio. Resulta más efectiva y fácil la comparación del avance de reducción de riesgos, y puntualiza quién está fallando en la implementación de medidas. Además, enriquece la información para los escenarios de riesgos, siendo estos más realistas para la toma de decisiones.

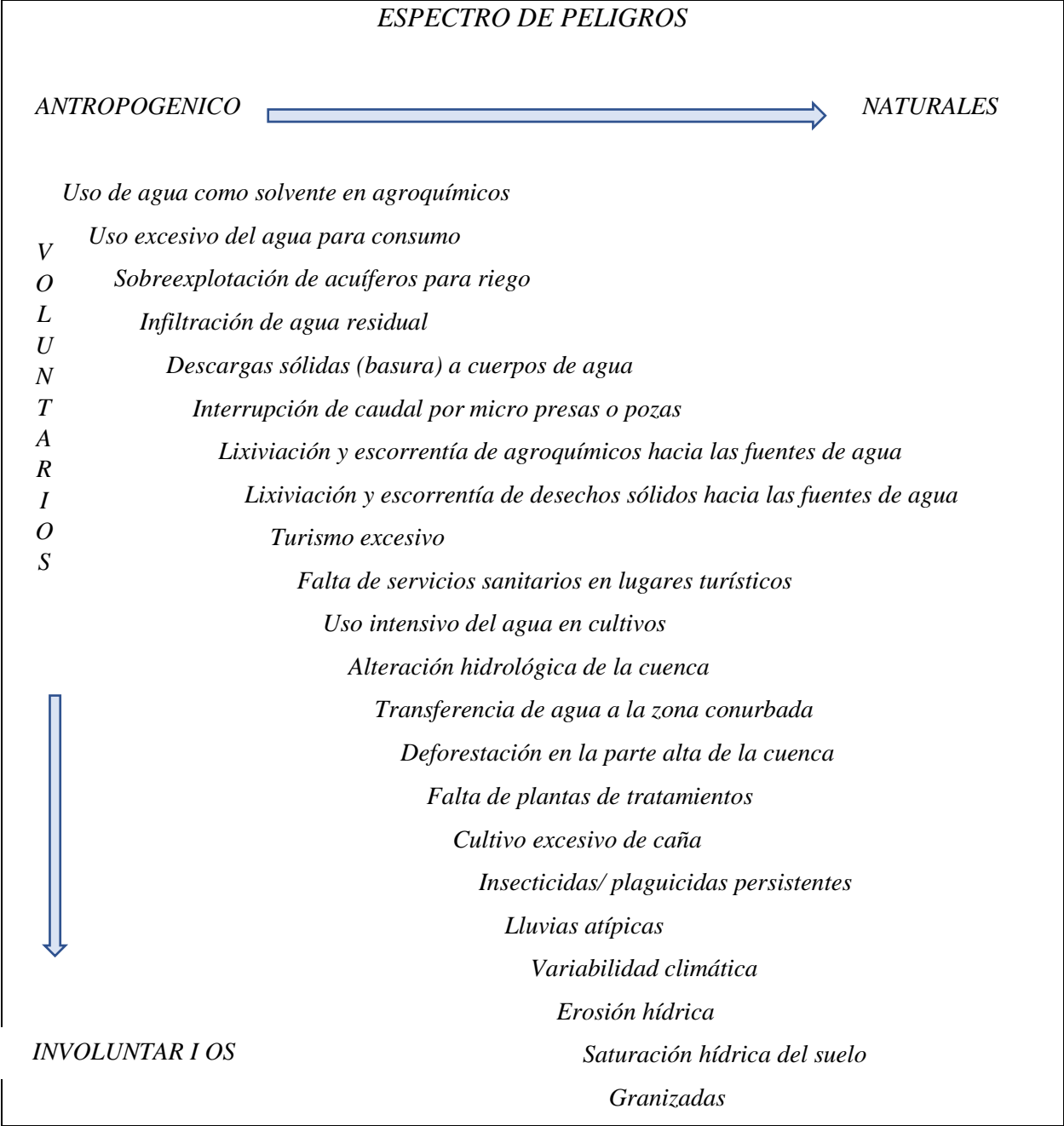
### **1.7. Justificación de los peligros naturales/antropogénicos**

Se entiende por peligro o amenaza a la probabilidad latente de que un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antropogénico pueda ser potencialmente dañino en las personas, la producción, la infraestructura y los bienes (Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, 2021). En este caso de interés para el área de estudio, el peligro o amenaza es potencialmente dañino a los recursos hídricos en el cual se toma en cuenta la intensidad y el periodo de retorno.

La caracterización de la zona en los capítulos posteriores otorga una noción de los peligros presentes. Permite un panorama que integra factores externos e internos que impactan la cuenca, lo cual ayuda en analizar mejor el riesgo y disminuir su impacto.

La identificación de peligros es el primer paso para realizar el análisis ambiental del riesgo del agua. En el estudio, se razonó el ciclo del agua en todas sus posibles formas e interacciones en la cuenca.

Se realizó una lista de los principales peligros que afronta la zona clasificándolos de antropogénicos/naturales y de exposición voluntario/involuntario (Figura 10).



*Figura 10. Espectro de peligros*

Los peligros en la figura anterior se identificaron a través de la información previa generada en las páginas oficiales mexicanas y textos científicos que plantean la situación por la que atraviesa la

cuenca del Río Gallinas, a su vez en las noticias de periódicos locales, en los que las personas han interpuesto denuncias de algunos peligros antropogénicos expuestos.

En el área de estudio se identificaron 21 peligros de los cuales 16 son antropogénicos y 5 de origen natural, tales como lluvias atípicas, erosión hídrica, saturación hídrica y granizadas.

En los peligros de exposición voluntaria se consideran las actividades productivas que se realizan libremente en la naturaleza como, por ejemplo: el turismo, la deforestación, descarga de aguas residuales a los cuerpos de agua sin previo tratamiento, desechos sólidos en ríos o manantiales. Estos van de la mano con los peligros antropogénicos o sociales.

### **1.8. Elementos de variables considerados como vulnerables**

De acuerdo con CENAPRED la vulnerabilidad se entiende como “un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza”. Este estudio es basado en los recursos hídricos de la cuenca del Río Gallinas, por lo tanto, el agua es a quien se vulnera en la exposición de los peligros antes mencionados.

La vulnerabilidad también representa las condiciones que imposibilitan o dificultan la recuperación autónoma del agua y por consiguiente de la sociedad, ya que es un recurso indispensable para el desarrollo de la vida misma.

¿Cómo se origina la vulnerabilidad del agua, cómo va creciendo y cómo se acumula? ¿A qué es vulnerable el agua? El agua es vulnerable a procesos naturales dentro de la misma interacción del ciclo hidrológico, pero sufre mayor estrés cuando se agregan factores sociales inherentes. Todas las actividades humanas requieren directa e indirectamente agua para llevarlas a cabo, mientras más crecimiento demográfico y mayor aumento de actividades económicas, la presión sobre los recursos hídricos será mayor y acumulativa.

La interacción de los peligros y la vulnerabilidad permiten desarrollar escenarios de riesgos que se utilizan para determinar los focos de contaminación, y los receptores potenciales de la contaminación detectada.

Existen estudios enfocados en diferentes tipos de vulnerabilidad del agua, aunque resulta complejo cuantificar la vulnerabilidad, ya que es un fenómeno intangible que engloba un conjunto de elementos sociales (Escolero, Kralisch, Martínez, y Perevochtchikova, 2016). En este caso se cuantificará el grado de vulnerabilidad en que están los recursos hídricos, sin embargo, su determinación es un componente del riesgo a estudiar.

## **1.9. Proceso de evaluación del riesgo ambiental del agua**

### **1.9.1. Justificación de la metodología de evaluación**

La matriz de riesgos ambientales es una herramienta de gestión que muestra los riesgos y el nivel de impacto que conllevan diferentes actividades o fenómenos sociales o naturales. Es el método más común para evaluarlos, ya que su llenado es muy simple.

Para el análisis se requieren los datos generales de la zona, la descripción de actividades, aspectos económicos, sociales y ambientales, así como visita al área de estudio.

En la evaluación es necesario ponderar los riesgos enlistados y valorarlos, y posteriormente se realiza una comparación y selección de alternativas de los riesgos asociados.

### **1.9.2. Matriz de evaluación**

La matriz de evaluación plasma la información previa obtenida e identifica los peligros, el tipo y nivel de riesgos inherentes, las características del riesgo, sus posibles causas y a su vez sus posibles consecuencias. En la Tabla 4 se muestra los componentes de la matriz de riesgo.

Tabla 4: Matriz de evaluación de riesgo

Interrelación del ciclo del agua en la cuenca	Clasificación	Riesgo	Características del riesgo	Posibles causas	Consecuencias o causalidad
Se identificará por el peligro y consecuencias, asociada a: a). Uso, manejo y control, y b). Impacto adverso en el sistema ambiental	Se define debido a su naturaleza de origen	Probabilidad de que un suceso exceda un valor específico de daños sociales, ambientales y económicos en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado. UNICEF (2005).	Se describirán los atributos peculiares del riesgo	Se redactará el riesgo a partir del fundamento, motivo, origen y principio que lo origina	Toda acción o suceso del peligro-riesgo, derivado en las causas o efectos adversos al sistema ambiental estudiado

### 1.10. Determinación de los riesgos ambientales del agua

Los riesgos encontrados en el análisis fueron:

Contaminación de suelos y cuerpos de agua, este riesgo es de tipo antropogénico, debido a que la contaminación puede darse por aguas residuales, uso de agua como solvente en agroquímicos y descargas sólidas (basura) a cuerpos de agua. Esto puede ocurrir por efluentes originados en comunidades, por la propiedad del agua de ser disolvente universal y la sobre generación de residuos sólidos urbanos e industriales. El origen o motivo de estos riesgos puede ser el mal manejo de los drenajes de los domicilios, la falta de plantas de tratamiento y las escorrentías de la industria agrícola.

En cuanto a los residuos o basura en los ríos es evidente la falta de planes de manejo de residuos sólidos, la recolección sistemática y la falta de tratamiento de residuos sólidos.



Entre las posibles consecuencias se encuentran enfermedades como gastroenteritis, contaminación de metales pesados, mortalidad infantil y en la afección al medio puede ocurrir la contaminación de agua subterránea.

La mala gestión de aguas residuales (negras y grises), la característica de este riesgo de origen antropogénico es el contenido de contaminantes químicos y biológicos en concentraciones arriba del límite máximo permisible LMP.

Su posible causa es la gestión y manejo inadecuado del agua residual ya sea por falta de educación ambiental en la comunidad (hogar, escuelas, centros de trabajos), infraestructura deficiente o nula, vertidos no controlados y políticas públicas no aplicadas a pesar de los compromisos ambientales en que México se ha suscrito en los últimos años. Esto presenta un impacto negativo en la salud de la población y en la contaminación al suelo y al agua.

La pérdida de suelo y el arrastre de sedimentos en las aguas superficiales son dos riesgos antropogénicos que se dan por la erosión hídrica, cuando se provoca la degradación acelerada de la cobertura natural del suelo por el avance de la frontera agrícola, la tala ilegal de bosque o el urbanismo y por falta de planes de manejo agrícola. El impacto que ocasiona es negativo a los cuerpos de agua por el aumento de turbidez y material suspendido, pero también ocasiona altos costos de producción agrícola y amenaza a la seguridad alimentaria.

El abatimiento del nivel freático y el desabasto de agua también se consideran riesgos antropogénicos ya que tienen relación con el uso excesivo de agua para consumo humano. El agua es un derecho universal, ya que es el líquido vital del ser humano, pero la sobrepoblación, la falta de educación ambiental en el cuidado del recurso y fugas en las tuberías pueden ser las causas que originan estos riesgos. El impacto negativo recae en enfermedades, hambre y conflictos socioeconómicos para la población, a su vez, en la naturaleza puede ocurrir la desaparición de especies.

Los riesgos de sobreexplotación de acuíferos para riego, agotamiento de reservas de agua subterránea, pérdida de manantiales, incremento del costo de extracción y pérdida de rentabilidad de la actividad agrícola son de tipo antropogénico, ya que se producen por la sobreexplotación de

acuíferos para riego, por el incremento en la superficie de irrigación y la producción de diversidad de cultivos.

Las posibles causas son las concesiones de pozos sin supervisión, el aumento de la población-demanda y el crecimiento económico del sector agrícola. El impacto negativo sobre la salud y el medio ambiente son enfermedades, hambruna, desaparición de especies y conflictos socioeconómicos.

Deterioro de la calidad del agua subterránea y la falta de agua segura para riego o consumo provocado por la infiltración del agua residual, es un riesgo antropogénico ocasionado por sistemas de drenaje inexistente o fallas en el mismo o por vertidos no controlados o clandestinos.

Las posibles causas son: falta de fondos para mantenimiento de fugas, falta de educación del manejo residual de las aguas, falta de gestión de aguas residuales y la capacidad hidráulica del drenaje rebasada. Las consecuencias asociadas a la salud por enfermedades gastrointestinales son altas, además de que aumenta el costo en la potabilización del agua subterránea.

Los riesgos de incremento de nutrientes en cuerpos de agua/eutrofización, contaminación de agua subterránea, que produce el peligro de lixiviación y escorrentía de agroquímicos hacia las fuentes de agua, por el exceso de agroquímicos en plantaciones y agroquímicos con alta persistencia en suelos, también es de tipo antropogénico. Las causas son: la falta de herramientas empleadas para clasificar a los plaguicidas en función de su riesgo de lixiviación, falta de manejo de plagas asociadas a cultivos, falta de supervisión de los organismos reguladores y malas prácticas de aplicación de agroquímicos, siendo sus posibles causas el deterioro de cuerpos de agua, el alto costo de saneamiento y, por ende, enfermedades.

La contaminación del agua subterránea por el peligro latente de lixiviación y escorrentía de desechos sólidos hacia las fuentes de agua (riesgo antropogénico), la característica de este riesgo se da por los desechos sólidos municipales que son colocados en tiraderos a cielo abierto. Algunas causas pueden ser la falta de gestión de desechos sólidos, falta de educación ambiental y la falta de inversión para relleno sanitario, como consecuencia a esto se encuentran las enfermedades por el deterioro de cuerpos de agua y el alto costo de saneamiento.

La contaminación y deterioro de cuerpos de agua superficiales por el peligro del turismo excesivo, que también es un riesgo antropogénico, se caracteriza por la sobresaturación de espacios naturales con turistas con poca educación ambiental. Las principales causas son la falta de planes de manejo ecoturísticos y la falta de educación ambiental, lo que provoca el deterioro del paisaje, la pérdida de ingresos económicos, alto costo de saneamiento de agua y la pérdida de flora y fauna.

El incremento de patógenos al agua por la apertura de parajes (riesgo antropogénico) sin requerimientos, sin servicios sanitarios, en lugares turísticos a causa de la falta de supervisión de las autoridades, falta de planes ecoturísticos, falta de educación ambiental, puede ocasionar enfermedades, cambios físicos y químicos en los afluentes y por consiguiente la degradación del paisaje y del recurso hídrico y ambiental.

El riesgo de disminución de la disponibilidad de agua (riesgo antropogénico) por la característica del riesgo agricultura intensiva bajo riego, fuente importante de producción de alimentos, dado por el peligro del uso intensivo del agua en cultivos, tiene por causa la falta de cumplimiento de tratados ambientales internacionales, falta de manejo de planes agrícolas y falta de cumplimiento y supervisión a caudal de concesión. Las consecuencias recaen en la salud y el medio ambiente, como son las enfermedades, la crisis de soberanía alimentaria, el deterioro de ecosistemas y los conflictos socioeconómicos.

El riesgo del desequilibrio ambiental en ciclo hidrológico ocasionado por alteración hidrológica de la cuenca (riesgo antropogénico) tiene su origen en sobrepasar el volumen de agua disponible de la cuenca por sobre extracción de agua. Las causas de este riesgo son: por las políticas públicas no aplicadas, concesiones en acuíferos sobreexplotados y la falta de educación ambiental a productores extensivos, como consecuencia ocurren conflictos socioeconómicos, pérdidas de cultivos, carencia de suministro de agua potable y sequías.

El riesgo de desequilibrio ambiental en ciclo hidrológico, también se ve presente al realizar transferencia de agua a la zona conurbada y la deforestación en la parte alta de la cuenca. La primera ocurre por aumento de la densidad de población y la dinámica de la expansión urbana y la segunda por aumento en la demanda de suelos agrícolas y deforestación desmesurada, ambas son de origen antropogénico, siendo sus causas: la falta de planeación estatal, falta de cumplimiento de políticas públicas, falta de gestión municipal y ambiental, falta de planes de

manejo agrícolas y la falta de educación ambiental para conservar bosques. Como consecuencia se obtiene desbalance de las cuencas hídricas y acuíferos, deterioro ambiental de las áreas de captación de agua superficial y pérdida de biodiversidad.

El riesgo de contaminación de cuerpos de agua se presenta en la cuenca por tres peligros y motivos diferentes. El primero es por falta de plantas de tratamiento, por incremento de industrias y urbanizaciones que descargan contenido de contaminantes químicos y biológicos; el segundo por el cultivo excesivo de caña, el cual también origina otro riesgo, que es la disminución de la disponibilidad de agua, que ocurre con el cambio de uso de suelo por el cultivo excesivo de caña; la deforestación del bosque de galería y el riego para cultivo aminora el caudal de agua disponible y el tercero por los insecticidas/plaguicidas persistentes que se encuentran en los productos agrícolas modernos con estabilidad para descomponerse, además poseen baja solubilidad en agua.

Las causas de este riesgo son: la falta de gestión ambiental, industrial y municipal, falta de educación ambiental de la importancia del saneamiento del agua, falta de regulación de gastos hídricos por CONAGUA, falta de educación ambiental a productores, falta de planes de manejo hídricos en cultivos, falta de agricultura sostenible y falta de incentivos económicos al sector agrícola. Las consecuencias entre otras son: la pérdida de especies, eutrofización y contaminación de agua, enfermedades, contaminación de cultivos, pérdida de paisaje y disminución de calidad de agua.

El riesgo por inundación es de origen natural, se origina por exceso de agua en los ríos que sobrepasan su límite, lo que provoca el desbordamiento y por la degradación del suelo sin vegetación o por el tipo de relieve. Este riesgo puede ocurrir por el peligro de lluvias atípicas o por saturación hídrica del suelo. Las causas son: zona de incidencia de eventos climatológicos, falta de planes de manejo forestal, falta de educación ambiental y de campañas de reforestación y falta de gestión agrícola, teniendo como consecuencias las pérdidas en cultivos, escasez de alimentos, pérdida de la capacidad productiva del suelo, deslizamientos de laderas y pérdidas de vida humana.

La variabilidad climática lleva al riesgo de ausencia de lluvias/sequías y al riesgo climático ocasionado por la intervención compleja de fenómenos atmosféricos y factores humanos. Sus causas pueden ser: la mala adaptación del hombre a su entorno, incumplimiento de los Objetivos

del desarrollo ODS2015, falta de educación ambiental a la población en general, políticas públicas no aplicadas y la falta de planes de adaptación climática.

De los veintidós peligros enlistados en torno al ciclo del agua en la cuenca se identificaron veinticuatro riesgos que afectan la cuenca. Posterior a esto, se realizará una ponderación de los escenarios del riesgo para establecer los riesgos más significativos dentro de la cuenca.

En la Tabla 5 se muestra, como se obtuvo la puntuación para la selección de los peligros en la cuenca del Río Gallinas.

Tabla 5: Niveles de impacto

CRITERIOS		Probabilidad asignada		Referencia
		Suceso 1	Suceso 2	
Probabilidad o frecuencia	Puntuación			Datos recolectados en bibliografía y visita al lugar
< 1 vez/mes	Muy probable			
< 1 vez/mes - 1 vez/año	Altamente probable			
1 vez/año - 1 vez/ 10años	Probable			
1 vez/ 10años - 1 vez/ 50 años	Posible			
> 1 vez/ 50 años	Imposible			

*Fuente: en base a norma a UNE 150008:2008*

## **CAPÍTULO 2. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL PARA LA DETERMINACIÓN DE UN PATRÓN DE COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS QUE INCIDEN AMBIENTALMENTE LA CUENCA DEL RÍO GALLINAS.**

### **2.1. Descripción y elementos que conforman el análisis espacio-temporal**

El análisis espacial estudia los componentes del espacio para comprender sus interacciones bajo ciertas circunstancias. Las categorías del análisis que se estudian por separado son: Lugar, Medio, Paisaje, Región y Territorio. Estas categorías permiten comprender la naturaleza del territorio, identificar relaciones entre los individuos y el espacio, estudiar su problemática social, con el fin de realizar preguntas espaciales complejas (Ambrosio, Gonzalez, y Arevalo, 2002).

El análisis espacial permite combinar información de los componentes independientes y así, alcanzar nuevos conjuntos de información, y de esta manera se genera información integral y multisectorial.

En la cuenca del Río Gallinas se estudiaron las diferentes categorías y sus características.

- Características naturales: las montañas que delimitan la cuenca, los cuerpos de agua presentes.
- Características sociales: cómo está constituida socialmente la cuenca.
- Características económicas: los principales sectores que predominan, tal como la agricultura y el turismo.

### **2.2. Procesos de correcciones radiométricas y atmosféricas a las imágenes de satélite**

La imagen satelital se ha convertido en una fuente importante de información para los científicos que estudian los fenómenos naturales y sociales en nuestro planeta. Sus aplicaciones son variadas como, por ejemplo: dinámica de uso del suelo, vegetación, inundaciones, agricultura, incendios forestales, vulcanología, biología, entre otras.

Pero estas imágenes se les debe aplicar un proceso en etapas de auto rectificaciones atmosférica y radiométricas, por lo que la corrección radiométrica es una de las vías para tratar los valores de píxel de una imagen satélite para obtener valores de intensidad homogéneos, equilibrando

histogramas o corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles (Ambrosio, Gonzalez, y Arevalo, 2002). Entre los diversos motivos que influyen en estas distorsiones de las imágenes de satélite, se encuentran los fallos de los propios sensores, alteraciones en el movimiento del sensor o instrumento a bordo del satélite/avioneta o la interferencia de la atmósfera.

El software para el tratamiento de imágenes como el caso de ENVI, facilita la visualización de la información que proporcionan las imágenes satelitales. Dentro de sus múltiples operaciones y parámetros de tratamiento, se puede calcular diferentes índices para la aplicación científica.

De manera que dos de las funciones importantes al tratar imágenes de satélite, son la corrección radiométrica y atmosférica, mismas que se aplican para evitar cualquier distorsión en la imagen.

La corrección radiométrica implica la restauración de líneas o píxeles perdidos y también la corrección del bandeo de la imagen, que también puede ser por factores atmosféricos o fallas en el sensor.

$$L\lambda = \text{Grescale} \times Q_{cal} + \text{Brescal}$$

$L\lambda$  es la radiancia

**Grescale:** Factor de ganancia de reescalado para cada prohibición

$Q_{cal}$ : Valor de píxel calibrado cuantificado

**Brescale:** Factor de sesgo de reescalado para cada banda

La corrección atmosférica se aplica utilizando la herramienta FLAASH Atmospheric Correction, del software ENVI tratando de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre.

En el proceso de análisis de este trabajo de investigación, ambas se aplicaron a cada una de las imágenes satelitales.

## **2.3. Métodos para el cálculo del comportamiento espacio-temporal**

En este análisis se determinaron los comportamientos ambientales, para describir el cambio que ha tenido la vegetación y ciertos factores climáticos en la cuenca a lo largo de los treinta años de estudio. Para esto, se analizan dos índices (NDVI, NDWI), el cambio de uso de suelo, evapotranspiración, radiación solar y la precipitación.

### **2.3.1. Cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI)**

El NDVI es una técnica de percepción remota muy utilizada para estimar la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación de un área, en base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético.

La vegetación es muy susceptible a los cambios, por lo tanto, puede brindar información de afectaciones ecológicas y cambios en el clima (Bhandari, Kumar, y Singh, 2012). A su vez, brinda información sobre los desastres naturales para salvaguardar a la población de un área y generar nuevas estrategias de protección.

El NDVI indica la densidad relativa o la cantidad de la vegetación verde presente en una zona.

Para obtener los valores de NDVI se utilizó la siguiente información:

- Imágenes obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS
- La interpretación visual fue con imágenes Landsat con resolución espacial 30 x 30.
- Imágenes de satélite Landsat TM5 para los años de 1990, 2000 y 2010
- Bandas utilizadas 1,2,3,4,5 y 7
- Landsat OLI8 para el año 2020
- Proyección transversal de Mercator UTM zona 14 norte

En la tabla 6 se muestra, las fechas de las imágenes y los sensores utilizado para descargarlas.



Tabla 6: Fecha de las imágenes satelitales utilizadas

Sensor	Fecha
Landsat TM	5 28/01/1990
Landsat TM	5 05/04/2000
Landsat TM	5 12/02/2010
Landsat OLI	8 24/02/2020

El procesamiento de las imágenes se realizó en el software Exelis Visual Information Solution 5.2 ENVI® mediante la herramienta math band. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$NDVI = \frac{(FLOAT(B1) - FLOAT(B2))}{(FLOAT(B1) + FLOAT(B2))}$$

Siendo B1: Banda 3  
B2: Banda 4 } Años 1990, 2000, 2010

B1: Banda 4  
B2: Banda 5 } Año 2020

Los valores obtenidos son normalizados y se encuentran entre el rango -1 y 1. Los valores más cercanos a 1 representan una vegetación sana y los valores negativos corresponden a cuerpos de agua o nubes (Waters, Allen, Tasumi, Trezza, y Bastiaanssen, 2002).

Los cambios en la vegetación se incluyeron en ArcMap® para el proceso de análisis espacial. En la figura 13 se muestra el NDVI en las imágenes utilizadas de la vegetación en el área de estudio.

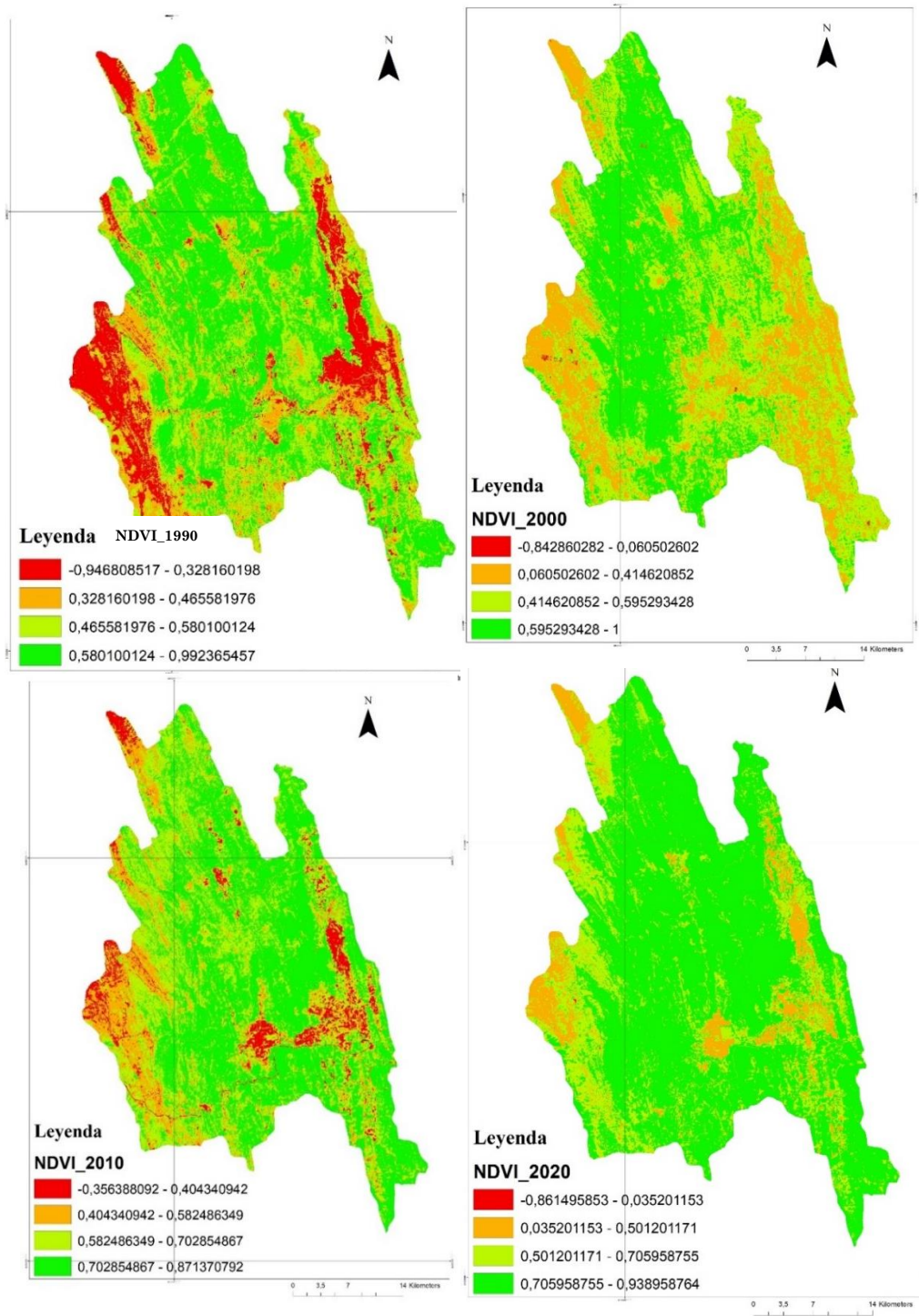
Según Eskandari, De Rosa y Amini (2015), los valores de NDVI corresponden a suelo desnudo, luego se observa una mezcla entre suelo desnudo y suelo con vegetación y los valores mayores son área con mucha vegetación.

En la figura 13 se observa que en 1990 predomina valores mayores a 0.5, por lo tanto, para este año la vegetación es abundante y prevalecen los bosques densos, aunque se ve interrumpido por pastizales o suelo desnudo. El suelo desnudo se encuentra en la parte alta de la cuenca en la localidad Llanitos, Ciudad Maíz, al este en Las Canoas, Cárdenas y al oeste de la cuenca en Damián Carmona junto a la ribera del Río Gallinas en el municipio de Tamasopo.

Se aprecian áreas desprovistas de vegetación y predominio de los pastizales, localizados donde converge el río San Nicolás y el río Ojo Frío, los cuales forman la cascada El Aguacate, que luego se extiende en toda la formación del Río Gallinas hasta la cascada de Tamul. La ribera del Río Gallinas se ve afectada con valores muy bajos de vegetación sana, aunque las áreas de bosque tienen valores altos, se aprecia una mejor distribución de estos en la cuenca en comparación a 1990.

En el año 2010, los valores indican una calidad de vegetación inferior al año 2000, pese a esto, se da una recuperación de bosque en el área circundante de la ciudad de Tamasopo y cerca de la cascada de Tamul. En los años 1990, 2000 y 2010 se observa valores de NDVI bajos en las ciudades de Tamasopo, Agua Buena y Tambaca, por los cultivos de caña de azúcar que suministran al ingenio Alianza Popular localizado en esta última.

Los valores de NDVI en el año 2020 presentan una vegetación sana en la mayoría de la cuenca, se observa una recuperación de área de bosque en la parte alta de la cuenca y en la zona media. Las áreas con suelo desnudo han disminuido, a su vez, se observa un aumento de la vegetación sana en la ribera del Río Gallinas y del río Tambaca. Esta mejora puede darse debido a que en la zona de la Huasteca Potosina se ha implementado el Sistema Agroforestal (Programa Estratégico del Estado de San Luis Potosí 2006-2025) para darle un uso sostenible al suelo.



*Figura 11. Análisis del Comportamiento NDVI 1990-2020*

### 2.3.2. Cálculo del índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI)

El NDWI se emplea como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses. Este índice aporta información sobre el cambio de los recursos hídricos y la influencia de los seres humanos sobre ellos, por lo cual es una herramienta indispensable para la gestión del agua (Memon, Muhammad, Rahman, y Haq, 2015).

El índice se emplea como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses.

El proceso es muy similar a NDVI, el rango de medición es el mismo (-1 a 1). Estas bandas muestran la humedad en el suelo o en la vegetación. Los valores  $\geq 0$  corresponden a superficies brillantes sin vegetación ni agua, los valores  $0 \leq$  presentan agua y vegetación sin estrés hídrica, los valores más cercanos a 1 indican el mayor contenido de agua (Delpino, Portillo, y Mora, 2018). Las imágenes satelitales utilizadas fueron las mismas que se emplearon para el cálculo del NDVI.

Los cuerpos de agua tienen una radiación baja y una fuerte absorción en el rango de longitudes de onda del infrarrojo visible.

La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$NDWI = \frac{(FLOAT(B1) - FLOAT(B2))}{((FLOAT(B1) + FLOAT(B2)))}$$

Siendo B1: NIR B4;  
B2: SWIR B5 } Años 1990, 2000 y 2010

B1: NIR B5;  
B2: SWIR B6 } Año 2020

En la figura 14 se muestra el análisis de NDWI que se realizó en la cuenca del Río Gallinas, en el cual se observa que la vegetación no sufre de estrés hídrico y existe presencia de grandes cantidades de agua.

En el año 1990 se obtuvieron los valores más bajos de NDWI ( $\geq 0$ ), ubicados en el parteaguas, este y oeste de la cuenca, esto concuerda con el mismo comportamiento del NDVI del mismo año, donde predominaba el suelo sin vegetación.

Para el año 2000 se observa un aumento de agua en la cuenca con respecto a 1990. El mayor valor de NDWI se concentra en la Sierra Madre Occidental, por otro lado, los principales ríos de la cuenca, tales como el Río Gallinas, río Tamasopo y la cascada de Tamul, se ubican en las áreas con valores bajos o muy bajos de NDWI.

En el año 2010 el NDWI presenta valores altos que se distribuyen mejor en toda la cuenca. Los valores más bajos se encuentran en el área del río Tamasopo donde imperan los cultivos de caña de azúcar por la cercanía al ingenio Alianza Popular,

En el año 2020, el comportamiento es similar al 2010, excepto que presenta valores de NDWI de 1, es decir la cuenca llegó a su máxima capacidad hídrica. El área de la cascada de Tamul se ha recuperado y ha aumentado su valor de NDWI.

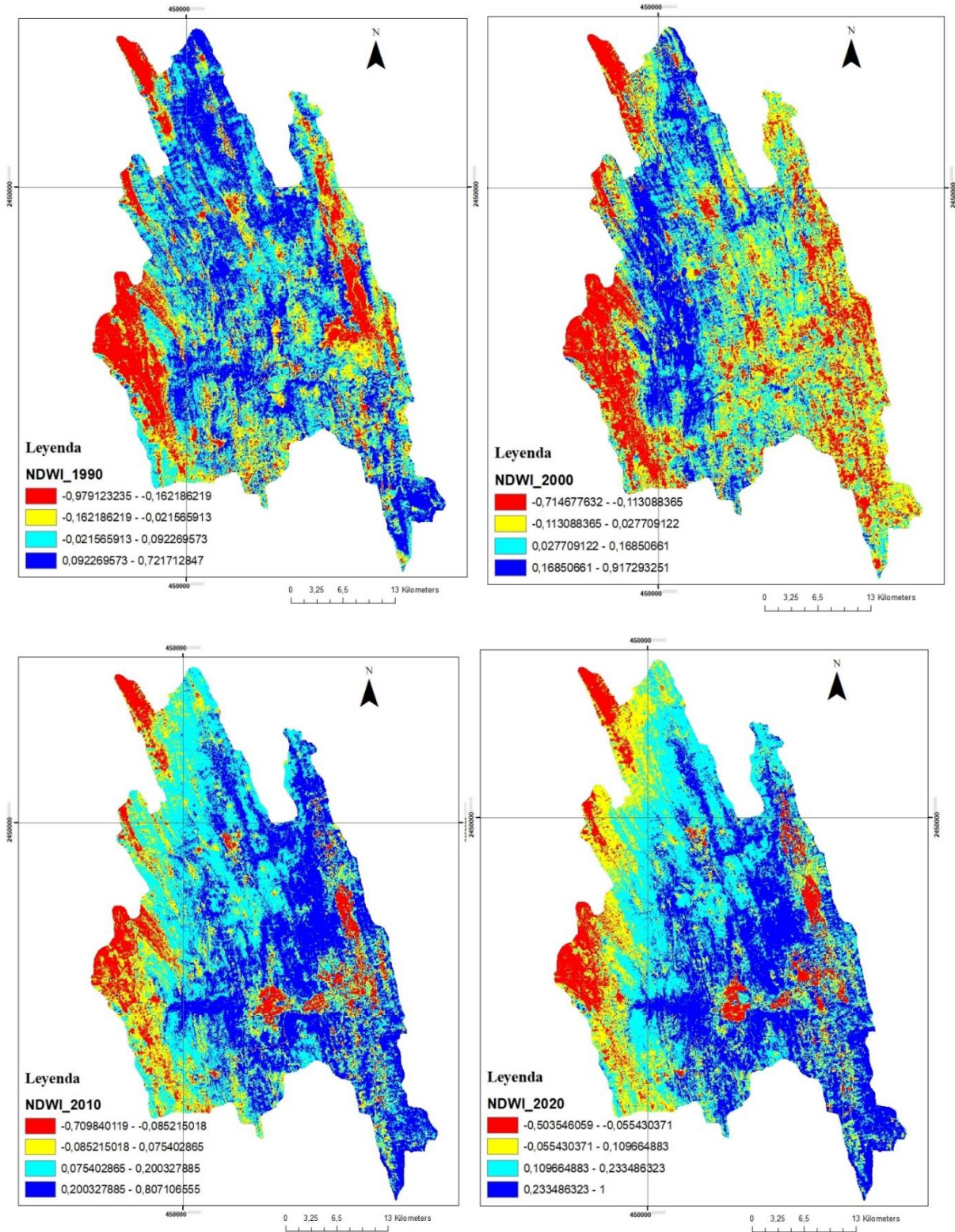


Figura 12. Variación del NDWI en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020

### **2.3.3. Análisis del cambio de uso de suelo de la zona de estudio**

La cobertura de suelo es importante para la elaboración de modelos en estudios climáticos, hidrológicos y biológicos. La cobertura de suelo es considerada como una de las 13 variables terrestres esenciales para el monitoreo del clima entre otros.

La necesidad de generar mapas de suelos es para un conocimiento específico del potencial productivo de los suelos y así maximizar las aptitudes de los cultivos a través de prácticas de manejo adecuadas. Otros factores para el desarrollo de éstos, es que contribuyen al éxodo rural, permiten identificar los riesgos para la producción y son una herramienta indispensable para el ordenamiento territorial, por lo tanto, estos mapas contribuyen a minimizar los impactos negativos del suelo.

El propósito de estudiar el uso y cambio de suelos en la cuenca es para reconocer a través del tiempo la situación del recurso, referente a la intervención humana. En el área de estudio y alrededores se han propuesto programas forestales, programas de protección ambiental, conservación de hábitat de especies de animales; el cumplimiento a cabalidad de todas estas iniciativas se debe reflejar en la siguiente cartografía.

Los mapas de uso de suelo se descargaron del Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO, los cuales fueron generados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013), a escala 1:250 000, y empleando la técnica de fotointerpretación con imágenes de satélite, posteriormente los mapas fueron procesados en ArcMap.

Se observa que el bosque de Encino sigue prevaleciendo en la cuenca, el cual está relacionado con el bosque Mesófilo de Montaña. El área de pastizal inducido en 1990 es igual para el año 2020, es decir en 30 años no se presenta una disminución de bosque para introducir pasto para ganadería. Por otro lado, en el año 2020 se observa que el pastizal cultivado (sur-oeste de la cuenca) ha disminuido.

El área agrícola se localiza en los alrededores del Río Gallinas, se agrupó la agricultura temporal y permanente con y sin riego. Se puede observar un comportamiento similar al NDVI, debido a que en esta área se encuentran valores bajos del índice.




























La agricultura en el año 2020 ha ido avanzando hacia las áreas de selva y de vegetación secundaria en el sur de la cuenca. Por lo que se puede apreciar en dicha zona sur de la cuenca, que en 30 años la selva ha desaparecido, siendo desplazada por la vegetación secundaria y la capacidad productiva agrícola.

En la figura 13 se muestra la leyenda de los mapas de uso y cambio de suelo

**Leyenda**

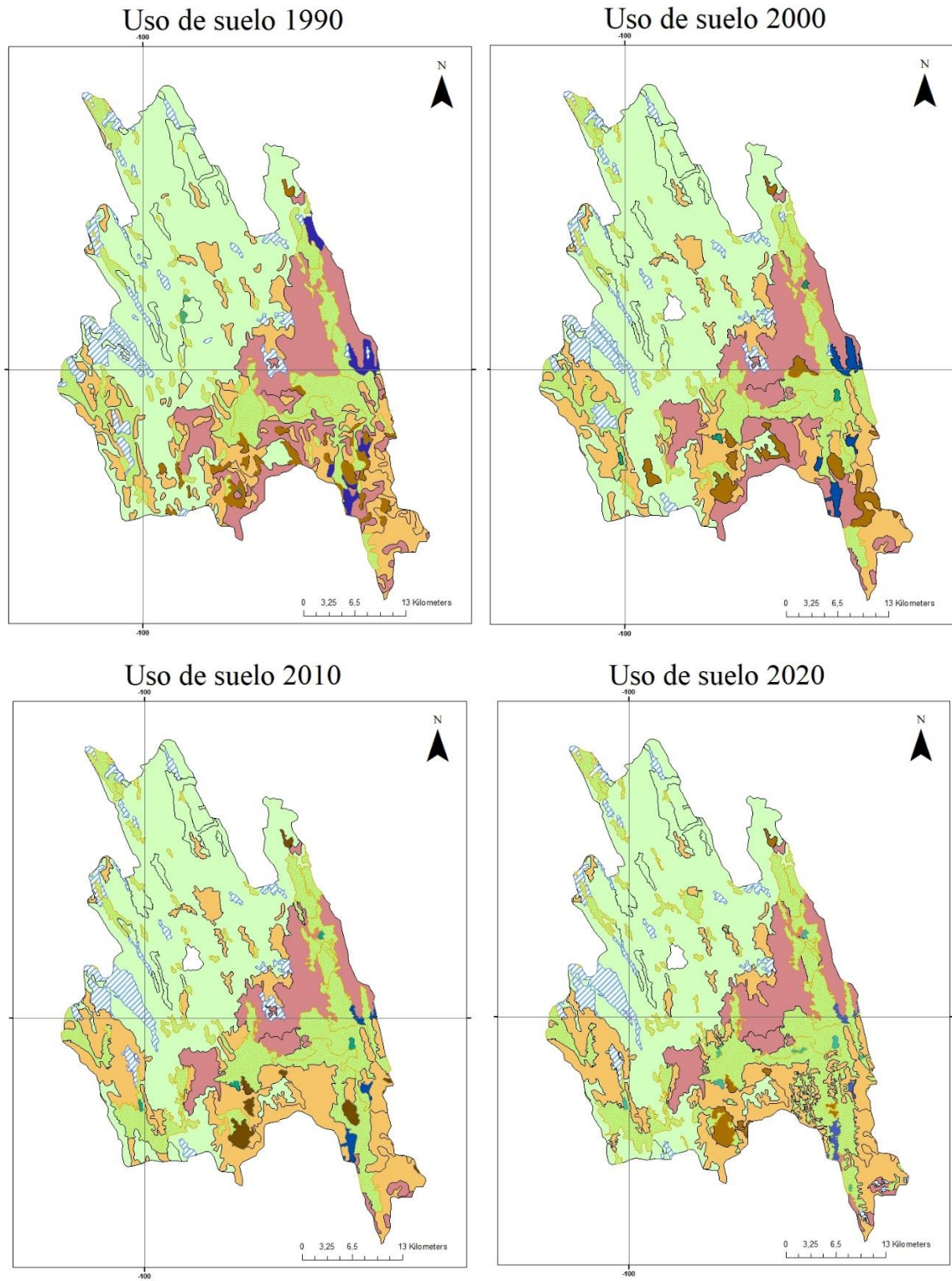
**vege\_20**

**DESCRIPCIO**

 AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	 PASTIZAL INDUCIDO
 AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	 SELVA ALTA PERENNIFOLIA
 AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	 SELVA BAJA CADUCIFOLIA
 AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	 SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA
 AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	 URBANO CONSTRUIDO
 AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
 AGUA	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO
 BOSQUE DE ENCINO	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESAFILO DE MONTAÑA
 BOSQUE DE ENCINO-PINO	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESERTICO MICROFILO
 BOSQUE DE TA• SCATE	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO
 BOSQUE MESAFILO DE MONTAÑA	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
 PALMAR INDUCIDO	 VEGETACION SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA
 PASTIZAL CULTIVADO	 VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE BOSQUE DE ENCINO
	 VEGETACION SECUNDARIA ARBOREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA

*Figura 13. Uso y cambio de suelo*





*Figura 14. Uso del suelo y de vegetación 1990-2020*

### 2.3.4. Cálculo y análisis de la evapotranspiración de la zona de estudio

La evapotranspiración (ET) es un proceso generado por pérdidas de agua en el medio ambiente (Villón, 2002). En otros términos, la evaporación de la superficie terrestre (cuerpos de agua, suelo, superficies vegetales vivas o muertas), más la transpiración de las plantas (la evaporación de agua de la superficie de las células de las hojas de las plantas en crecimiento activo y el agua absorbida por las raíces desde el suelo) hace que se realice la transferencia total del agua a la atmosfera.

La evapotranspiración se obtuvo por el método de Thornthwaite el cual es recomendado en zonas húmedas, debido a las experiencias que permitieron el ajuste de dicho método fueron realizadas en las zonas húmedas y con abundante lluvia de Estados Unidos (Israelsen y Hansen, 1963). Este método solo requiere valores medios de temperatura y precipitación, el cual está disponible en estaciones meteorológicas convencionales, en cambio, las ecuaciones físicas requieren datos más complejos como dirección del viento y radiación neta (Sánchez, 1992).

Para el cálculo es necesario la evapotranspiración mensual  $e$ , en mm por mes de 30 días de 12 horas de duración.  $e = 16\left(\frac{t}{7}\right)^a$

Siendo:  $e$  = evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días, y 12 horas de duración

$t$  = temperatura media mensual en °C

$I$  = índice térmico anual =  $\sum i$

$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$   $i$  = índice térmico mensual

$a = 0.6751 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 0.01792 I + 0.49239$

$a$  = exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad

$e$  = evapotranspiración mensual sin corregir, en mm

Se utilizó el dato de temperatura promedio mensual de las estaciones.

Tabla 7: Estaciones meteorológicas utilizadas para dato de temperatura mensual

<b>Estación Meteorológica</b>	
Clave de estación	Nombre
24008	Cerritos
24026	Requetemu Hidroclimatológica
24036	Las Adjuntas
24043	Micos Hidroclimatológica
24054	Pedro Montoya Rioverde
24076	Santa Rosa
24114	Observatorio Rioverde
24139	Observatorio Tamuín

En la figura 17 se muestra que los valores más elevados se encuentran en la cascada de Tamul. Los valores oscilan en 3-4 mm en todos los años estudiados, en un día de verano la ET puede ser de 3 ó 4 mm, es muy fácil hablar de la evapotranspiración desde un lago, pero en un terreno con vegetación, se piensa que el agua que se ha evapotranspirado equivaldría a una lámina de agua de 3 ó 4 mm (Sánchez, 2022).

Se realizó una comparativa de ET de los años 1990, 2000, 2010 y 2020 tomando como base el mes de abril, tal como se observa en la figura 17. Los valores más altos a lo largo de los años (6.03-6.21mm) se encuentran en la estación 24139 Observatorio Tamuín y los valores más bajos están presente en la estación 24008 Cerritos (2.73-3.64), en el año 1990 el valor de ET se encuentra por debajo del valor de un día normal de verano.

El año 2000 tuvo la mayor variación de ET, en comparación con los otros años se observa un descenso en la estación 24054 Rioverde.

Los datos de 1990 y 2020 tienen similitud por lo que la evapotranspiración no ha variado en los últimos 30 años.

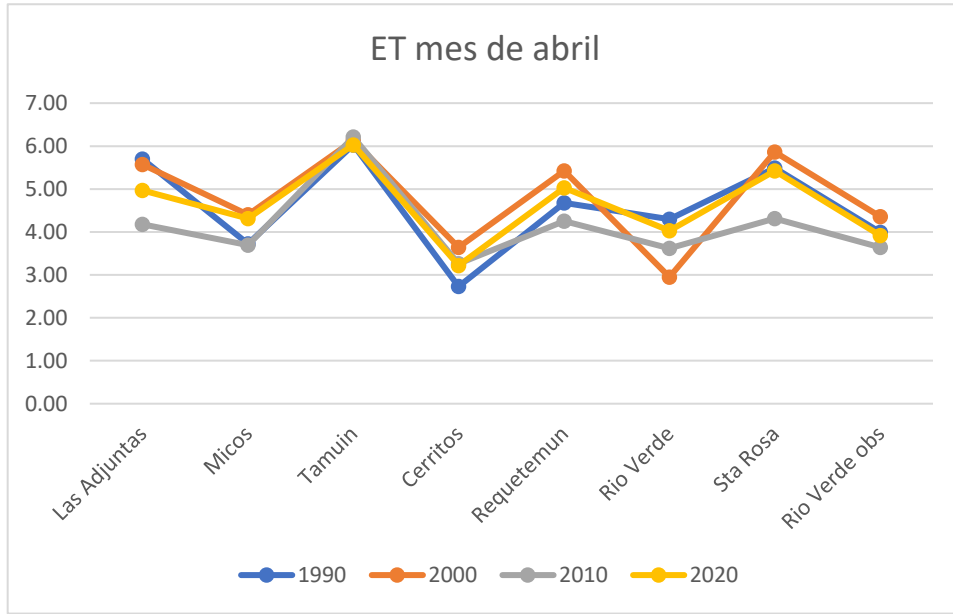
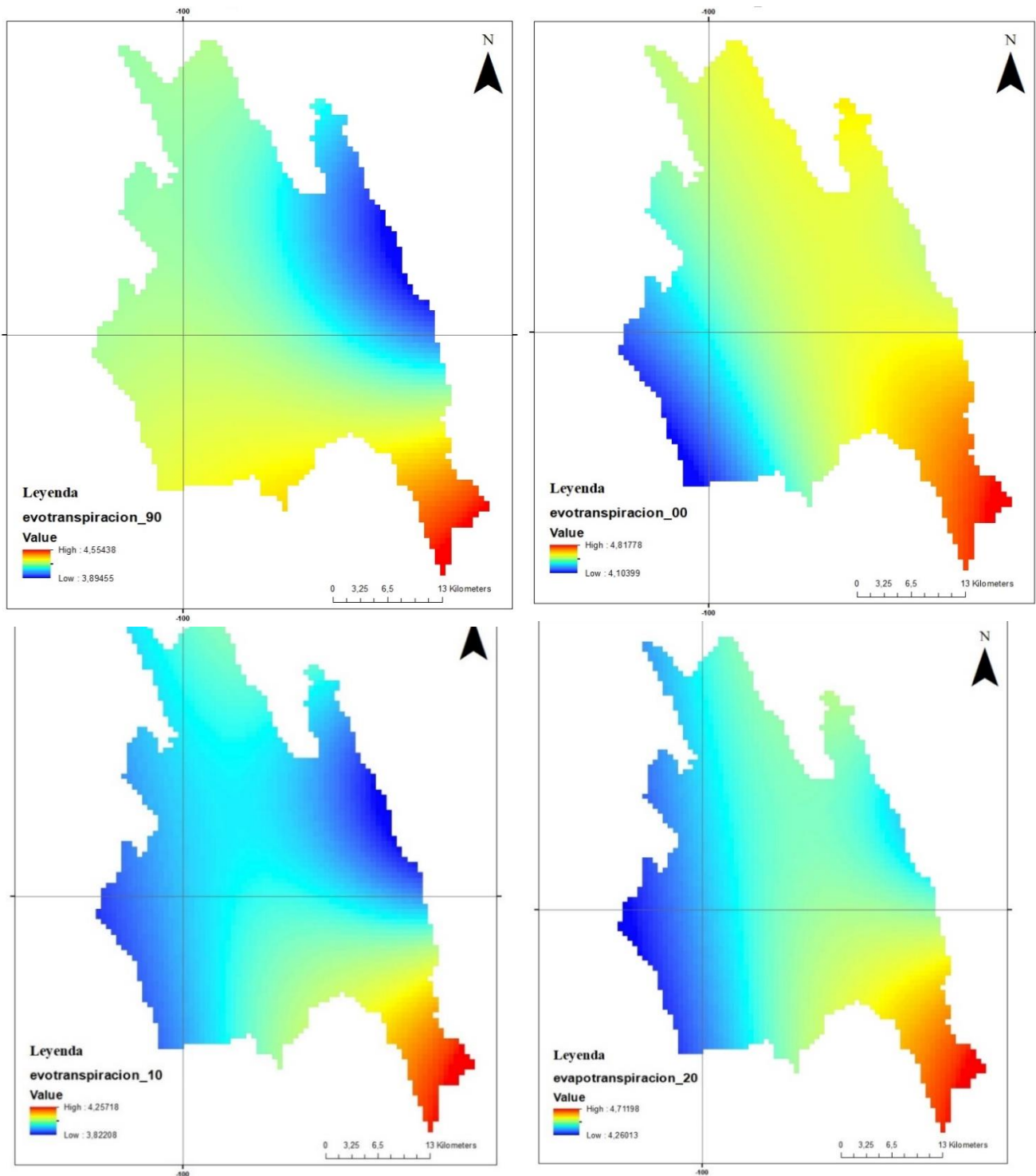


Figura 15. Gráfico de evapotranspiración mes de abril años 1990, 2000, 2010 y 2020



*Figura 16. Evapotranspiración en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020*

### 2.3.5. Cálculo del índice de Radiación Solar de la zona de estudio

La energía producida por el Sol es transferida al espacio como radiación solar por las ondas electromagnéticas. Esta energía se genera por reacciones nucleares por el hidrógeno dentro del núcleo (Duffie y Beckman, 2013).

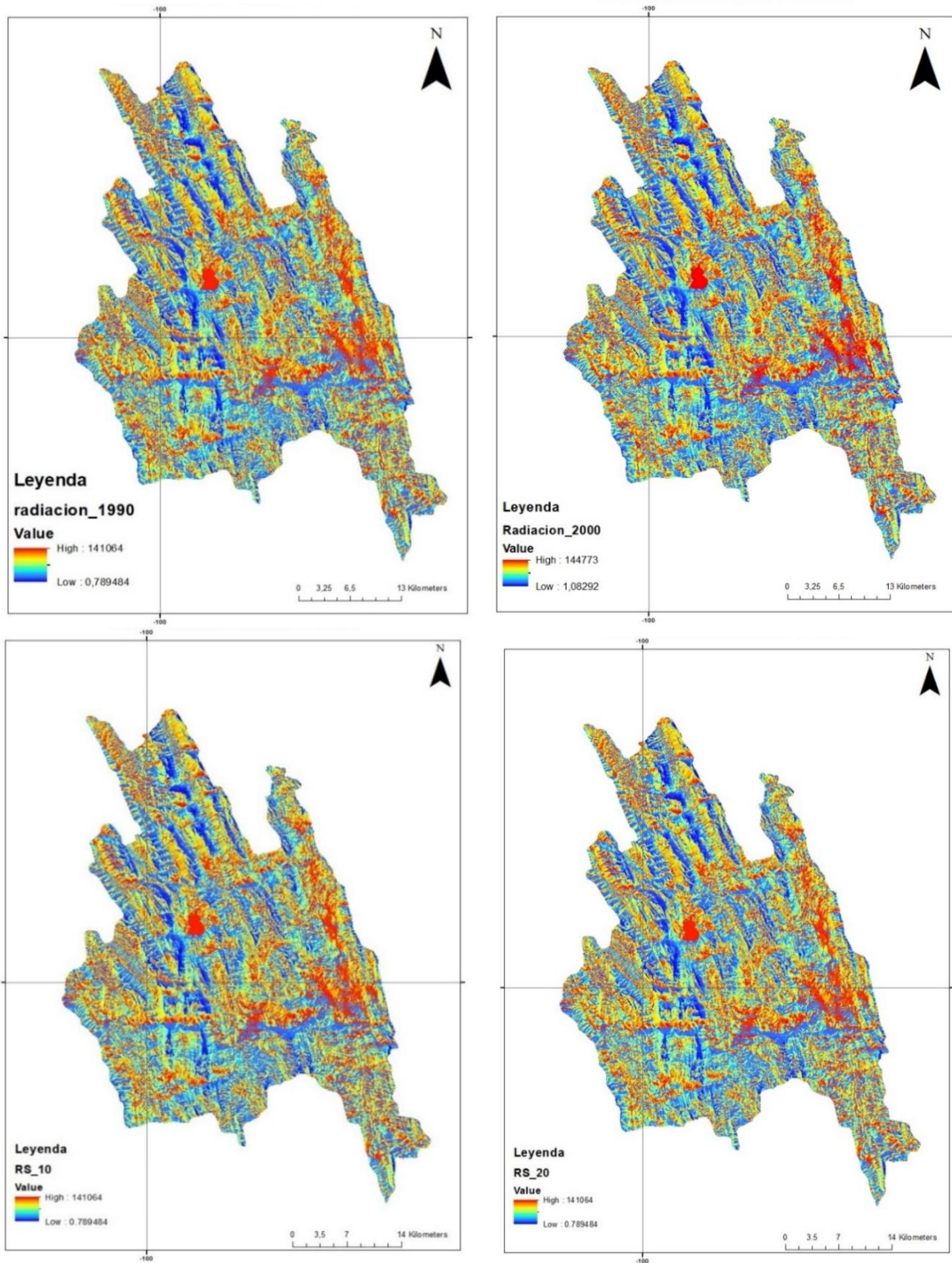
Los distintos rangos de radiación solar se miden en frecuencia y longitud de onda, siendo éstas inversamente proporcionales. Estos rangos se ordenan en el espectro electromagnético que van desde longitudes de onda corta con frecuencias muy altas, hasta longitudes de onda larga de frecuencias muy bajas.

Es necesario medir la radiación solar, ya que determina procesos atmosféricos de gran importancia. Asimismo, su aplicabilidad en diversas áreas ha permitido el avance tecnológico de generación alterna de energía eléctrica, sistemas de calentamiento de agua, mejoras en la salud de la piel, monitoreo agrícola, predicciones del clima entre muchas otras.

El cálculo se realizó con el modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca, a través de las herramientas del análisis espacial de ArcGIS®. El DEM se descargó del INEGI a una resolución de 30m, el periodo calculado fue de los primeros 120 días de los años estudiados (1990, 2000, 2010 y 2020). Los resultados obtenidos se presentan en unidades de  $WH/m^2$ .

A lo largo de los cuatro meses procesados, la diferencia de energía acumulada varía entre 0.7 y 1.4  $WH/m^2$ . En los mapas generados se observa que la incidencia de radiación solar es similar en los años estudiados. Las diferencias de radiación varían por decimales, teniendo el mayor valor el año 2000. La latitud juega un papel clave para obtener la declinación y posición solar, en zonas altas el Sol da con mayor fuerza, ya que la atmósfera absorbe menos rayos UV. Por eso, en la Sierra Madre Occidental se aprecian valores altos de radiación.

También se encuentran valores altos en el Río Gallinas y río Tamasopo; estos valores coinciden con la baja humedad presentada en el NDWI.



*Figura 17. Radiación solar de la cuenca del Río Gallinas 1990-2020*

### 2.3.6. Cálculo del índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

La sequía es un fenómeno natural que ocurre dentro de un espacio-temporal, siendo inevitable, impredecible y recurrente, la cual puede traer consecuencias catastróficas para las zonas vulnerables (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

Según la Sociedad Meteorológica Americana (AMS) (1997) la sequía se clasifica en:

- Sequía agrícola. Se produce por el déficit de humedad en el suelo y afecta a la producción de cultivos.
- Sequía hidrológica. Ocurre cuando se bajan los niveles o el flujo de las aguas superficiales
- Sequía meteorológica. Se presenta cuando existe un déficit de precipitación en relación con la media.
- Sequías socioeconómicas. Son el resultado de los impactos negativos de los diferentes tipos de sequía antes mencionados en las actividades sociales y económicas de las comunidades.

Según Campos (2018), en su análisis estadístico de sequías en el estado de San Luis Potosí presenta los años de ocurrencia de las sequías meteorológicas en los climas húmedos que corresponden principalmente a la zona de la Huasteca Potosina.

Complementario a esto, el estudio de implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina (Algara , Contreras, Galindo, y Mejía, 2009) muestra las áreas de sequía (muy fuerte, severa y muy severa) en la zona mencionada, haciendo referencia que el aumento de la severidad en las sequias y la disminución de precipitación son un hecho de deterioro ambiental.

El SPI es un índice sencillo que requiere únicamente del parámetro de precipitación, elaborado por McKee, Doesken y Kleist en 1993.

El SPI se basa en la probabilidad de precipitación, considerando la precipitación observada para cualquier escala temporal. Este índice es utilizado en investigaciones o en modo operativo en más



de 70 países. Además, una gran ventaja es que ofrece una alerta temprana de la sequía que se puede utilizar para valorar la severidad.

Se pueden utilizar diversas técnicas para generar un mapa continuo de sequía meteorológica. También se puede interpolar una superficie con valores estimados de las estaciones meteorológicas utilizando las técnicas de interpolación más comunes: Kriging, Spline y la ponderación de la distancia inversa.

En la interpretación de los datos, se observa que los valores inferiores a -1 hacen referencia a precipitaciones menores a la media o bien a la sequía del lugar. Los valores positivos indican precipitaciones superiores al valor de la mediana. Cabe destacar que, se requieren al menos treinta años de datos continuos para mapas que muestren un comportamiento más realista en varias escalas de tiempo, asimismo, los valores acumulados facilitan el análisis de la magnitud de la sequía (Organización Meteorologica Mundial , 2012).

Tabla 8: Valores del índice normalizado de precipitación

2 a más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 a menos	Extremadamente seco

Los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas se obtuvieron del Sistema Meteorológico Nacional SMN/ CONAGUA, monitor de sequía en la opción del SPI.

Se tomaron 27 estaciones de las cuales 9 pertenecen al estado de San Luis Potosí, 8 a Tamaulipas, 5 a Querétaro, 3 a Veracruz y 1 a Hidalgo.

El número de estaciones con que se trabajó estuvo limitado a las estaciones disponibles en los archivos de SMN. Se utilizaron periodos cortos SPI de 1 mes, en el que se presentan las condiciones a corto plazo, ya que su empleo se relaciona con eventos meteorológicos de sequía y al estrés de los cultivos durante el crecimiento. La selección de los meses se realizó según la imagen satelital con menos nubosidad, es decir el mes con menos posibilidad de precipitación.

En ArcMap se aplicó una interpolación, de la cual se obtuvo que en el mes de enero y marzo de los años 1990 y 2000 respectivamente, fueron meses normales o aproximadamente normales de precipitación con valores similares de 0.5 a 0.1.

En el 2010 se trabajó con el mes de febrero (2.3 a 1.7), se observa que sus precipitaciones estuvieron por encima de la media. Se aprecia un cambio de las zonas con precipitaciones más bajas en comparación a los años anteriores, en los años 1989 y 1999 hubo sequías generalizadas en el altiplano potosino y la zona media, por lo que el cambio puede darse por los valores bajos de precipitación en las estaciones de estas zonas (Campos, 2018).

El SPI de febrero 2020 fue moderadamente seco, los valores oscilan entre -0.3 y -1.1, es el año que presenta menos precipitación. La clasificación de sequía, según el centro de prevención a desastres, indica que el grado de peligro de la sequía para el área de estudio se encuentra en el rango de muy severa a extremadamente severa, con duraciones de 2 a 3 años. Los fenómenos de sequía en los últimos años han aumentado, siendo más constantes y prolongados.

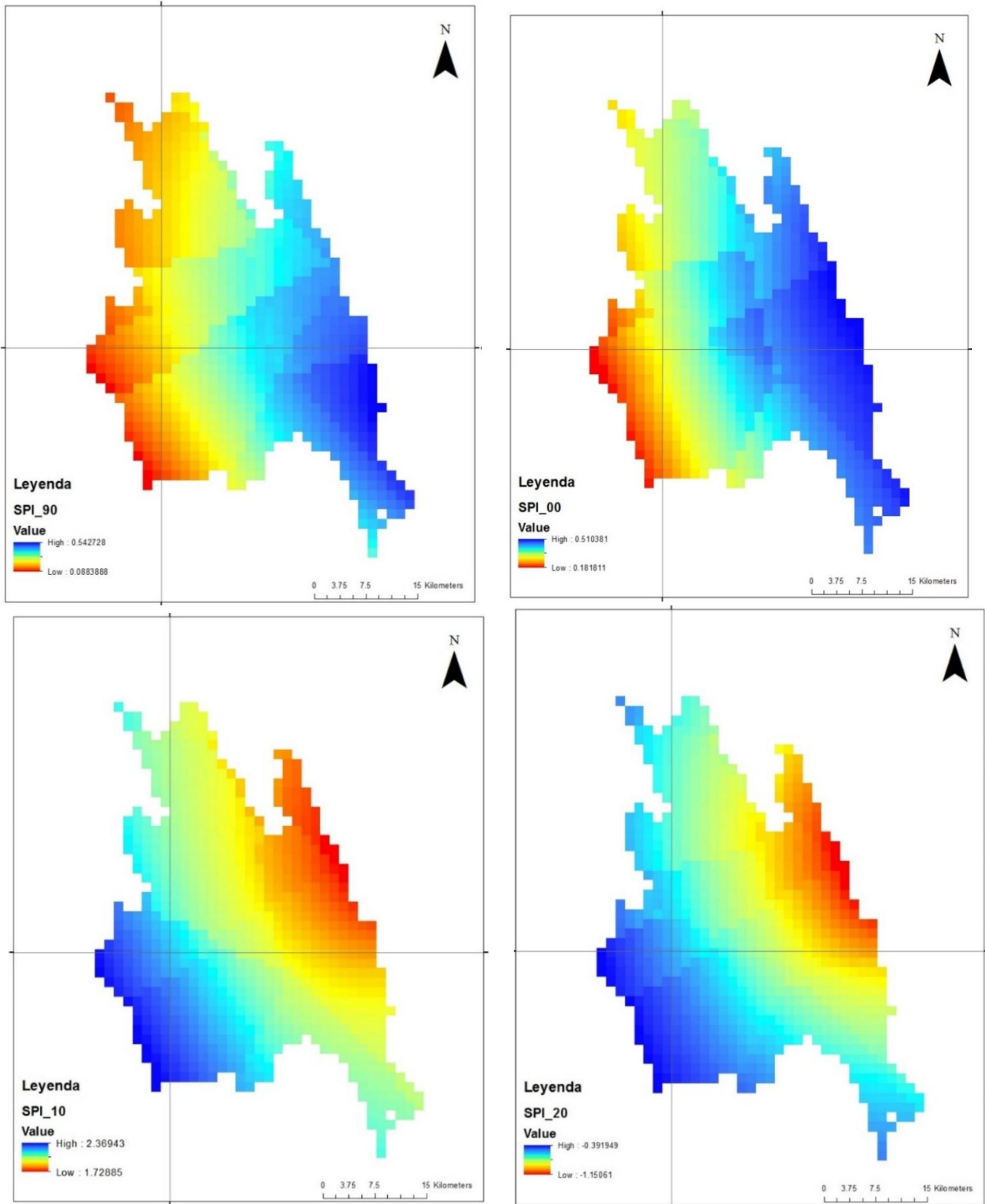


Figura 18. Comportamiento de las precipitaciones en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020

## **CAPÍTULO 3. CALCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RIO GALLINAS.**

### **3.1. Determinación de los principales riesgos para la temática del proyecto**

A continuación, se presentan los cinco riesgos más significativos de la cuenca del Río Gallinas, los cuales se derivan de los principales peligros; aguas residuales, turismo excesivo, cultivo excesivo de caña y variabilidad climática consolidados en la Tabla 7. Estos fueron seleccionados por ser riesgos de origen antropogénico, el cual causa de manera acelerada el deterioro del ambiente natural, pero se incluye uno de origen natural.

El riesgo de la mala gestión de las aguas residuales resulta por la contaminación y deterioro de cuerpos de agua, esto lo confirma Giraldo (2013) en su análisis de calidad del agua del río Tamasopo, uno de los ríos más importantes de la cuenca, en el que se presentan altos niveles de oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y materia orgánica, así como un alto contenido de coliformes fecales y coliformes totales, excediendo el límite permitido de la norma 127.

Los altos valores de estos parámetros también van ligados a la mala gestión de aguas residuales, ya que si las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) estuvieran en buen funcionamiento se evitaría la contaminación por ciertas sustancias (Secretaría de desarrollo social y regional San Luis Potosí, 2018).

En el estudio para la determinación de la calidad de agua, caudales y geoquímica del Río Gallinas y sus aportes hídricos ubicado en la Huasteca Potosina (Rodríguez, Cisneros, y Cardona, 2019), se menciona que la PTAR del municipio de Tamasopo no está en funcionamiento, las aguas son recolectadas más no tratadas y así son vertidas al río Tamasopo. En la delegación de Tambaca se localizaron aguas residuales estancadas con mal olor y coloración, además de residuos sólidos de gran tamaño. Una de las plantas de tratamiento del ingenio Alianza Popular aún se está construyendo por lo que las aguas industriales también son vertidas directamente al río, teniendo un caudal de descarga de 4,166.67 m<sup>3</sup> /día. El cultivo de caña además de provocar contaminación hídrica superficial también reduce la disponibilidad de agua para consumo humano, otros cultivos y cambios en el paisaje, como es el caso de la cascada Tamul.

El turismo también es un sector que impacta a la calidad y gestión del agua. Para satisfacer la demanda de turistas se abren parajes que no cumplen con las mínimas condiciones ambientales, no cuentan con instalación sanitaria y los residuos van a los cuerpos de agua. El número de turistas ha aumentado considerablemente y los dueños de los locales apuestan al volumen de visitantes por lo que los precios son muy bajos, lo cual no genera una conciencia de la importancia de los recursos hídricos de la zona. En el 2010 se tuvo una afluencia de más de 200,000 personas tan solo a los cinco sitios más turísticos de la cuenca.

En el riesgo climático, aunque es de origen natural, muchas de las actividades humanas pueden interferir en la variabilidad climática, tal es el caso de la deforestación para el avance de la frontera agrícola o para la creación de parajes turísticos. Como se observaron en los mapas presentados en el Capítulo 2, la cuenca ha sufrido cambios en estos treinta años de estudio, aunque en la última década se nota un cambio positivo, de forma que es notorio el deterioro ambiental en las áreas donde hay más actividades humanas.

En la siguiente matriz se muestra el peligro, el riesgo que conlleva, su clasificación (antropogénico o natural), las posibles causas y las consecuencias del riesgo.

Tabla 9: Matriz de riesgos ambientales del agua

No	El agua	Clasificación	Riesgo	Características del riesgo	Posibles causas	Consecuencias o causalidad
1	<b>Aguas residuales</b>	Antropogénico	La mala gestión de aguas residuales (negras y grises).	Contenido de contaminantes químicos y biológicos en concentraciones arriba del límite máximo permisible LMP.	Gestión y manejo inadecuado del agua residual: a) Falta de educación ambiental a la comunidad (hogar y centros de trabajo). b) Infraestructura deficiente o no existente en las comunidades. C) Vertidos no controlados (clandestinos). d) Políticas públicas no aplicadas.	El impacto muy negativo sobre la salud, la desnutrición y el medio ambiente: a). Enfermedades a la población b). Contaminación de suelos y cuerpos de agua.

2	<b>Turismo excesivo</b>	Antropogénico	Contaminación y deterioro de cuerpos de agua	Sobresaturación de espacios naturales con turistas con poca educación ambiental	a) Falta de planes de manejo ecoturísticos. b) Falta de educación ambiental.	a) Deterioro del paisaje. b) Pérdida de ingresos económicos c) Alto costo de saneamiento de agua d) Pérdida de flora y fauna.
3	<b>Variabilidad climática</b>	Natural	Ausencia de lluvias/Sequias Riesgo climático	Intervención compleja de fenómenos atmosféricos y factores humanos	a) Mala adaptación del hombre a su entorno b) Incumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible ODS2015 c) Falta de educación ambiental a la población en general d) Políticas públicas no aplicadas e) Falta de planes de adaptación climática	a) Deterioro de la calidad de vida humana b) Encarecimiento/pérdida de alimentos c) Pérdida de especies
4	<b>Cultivo excesivo de caña</b>	Antropogénico	Disminución de la disponibilidad de agua. Contaminación de agua	Cambio de uso de suelo por cultivo excesivo de caña. Deforestación del bosque de galería. Riego para cultivo aminora el caudal de agua disponible.	a) Falta de regulación de gastos hídricos por CONAGUA. b) Falta de educación ambiental a productores. c) Falta de planes de manejo hídricos en cultivos.	a) Pérdida de paisaje y biodiversidad. b) Disminución de calidad de agua.

A partir de los peligros se identificaron las variables de los factores del riesgo restante.

En la exposición se analizó la frecuencia y el tiempo prolongado a los peligros encontrados. Se estudió el contacto de los cuerpos de agua, la población y los agricultores con los riesgos y peligros.

En vulnerabilidad se planteó que el agua se vulnera y por consiguiente los sectores socioeconómicos involucrados en la cuenca, que en este caso son: la vulnerabilidad en el agua para consumo humano, agua para la agricultura y agua que necesita el sector turístico para su desarrollo.

En la gestión se determinó las necesidades para minimizar, erradicar y mejorar las condiciones de peligro. En este caso, para una buena gestión dentro de la cuenca se necesita PTAR adecuadas para el caudal y contaminantes a tratar, planes ecoturísticos integrales que abarquen la conservación de

los recursos ambientales y el desarrollo del sector, planes agroindustriales y planes de desarrollo sostenibles que reflejen congruencia con los objetivos del desarrollo.

En la figura 21 se muestra la síntesis de los factores del riesgo asociados en la cuenca, los cuales serán incorporados al modelo espacial

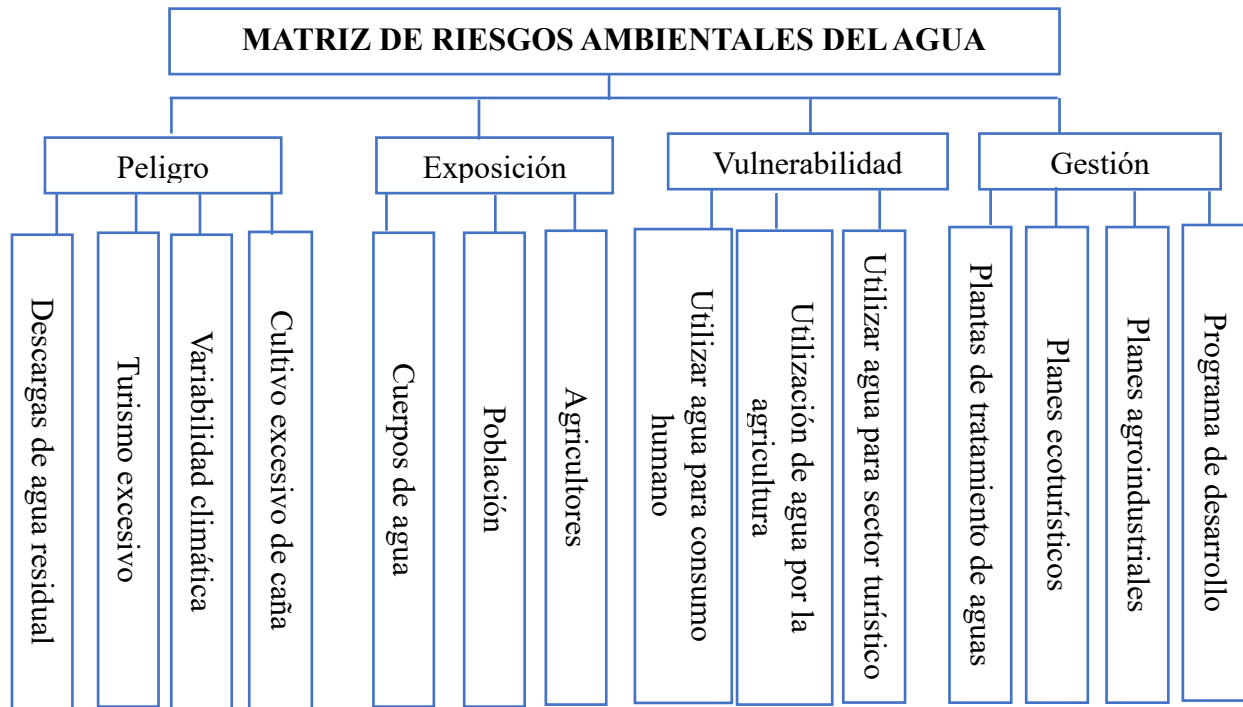


Figura 19. Matriz de riesgos ambientales del agua

### 3.2. Ponderación de variables por medio del Proceso Analítico Jerárquico

El método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) fue aplicado por Thomas L. Saaty para tomar decisiones de manera organizada, representando un problema a través de una estructura jerárquica (Osorio y Orejuela, 2008).

En el primer nivel se define el problema, luego se jerarquizan las decisiones desde arriba con el objetivo principal a cumplir, en el segundo nivel están los objetivos más amplios y el nivel más bajo está constituido por alternativas.

En el siguiente paso se realiza un conjunto de matrices de comparación por pares. Los elementos en el nivel superior se comparan con el del nivel inferior próximo. Se utilizan las prioridades obtenidas para sopesar las prioridades en el nivel que sigue. Para cada nivel inferior se agregan los valores ponderados y se obtiene una prioridad global. Se necesita una escala de números que señalen la importancia de un elemento respecto a otro.

### 3.3. Pesos de las variables evaluadas dentro del modelo espacial

En la evaluación del sistema se aplicaron los tres niveles A, B, C según su jerarquía, comenzando por el objetivo a cumplir. Se designo la letra A para el objetivo principal que se desea lograr, es el único elemento en este nivel, luego se colocan los criterios con letra B (*nb*) y por último la letra C (*nc*).

En la estructura de la matriz, las comparaciones pareadas son elementales, en este paso se evalúan o se asignan pesos a los criterios según su importancia. Lo importante de esta metodología es que los criterios cualitativos y cuantitativos pueden ser comparados con juicios informales para obtener prioridades, otorgándoles valores del 1 al 9 que describen la importancia entre niveles.

Nivel B  $A_k = (a_{ij})_{nb \times nb}$

Nivel C  $B_k = \{b^k_{ij} \mid i, j = 1-nc; k=1-nb\}_{nc \times nc}$

$a_{ij}$ : Importancia relativa entre los factores  $B_i$  y  $B_j$  desde la perspectiva del nivel A

Tabla 10: Escala de comparación del Proceso Jerárquico Analítico

Importancia de la intensidad	Definición
1	Misma importancia
3	Importancia moderada de uno sobre otro
5	Fuerte importancia de uno sobre otro
7	Muy fuerte de uno sobre otro
9	Extrema importancia de uno sobre otro
2,4,6,8	Valores intermedios
Recíprocos	Recíproco para comparación inversa

Para establecer la función objetiva del modelo se utiliza la siguiente ecuación

$$\text{MinCIF} (nb) = \sum_{i=1}^{nb} \left| \sum_{k=1}^{nb} (a_{ik} w_k) - nb w_i \right| / nb$$

$$\text{s.t. } w_k > 0, k = 1-nb$$



$$\sum_{k=1}^{nb} wk = 1$$

CIF( $n_b$ ): Índice de consistencia

$n_b$ : Números de elementos en el nivel B

$W_k$ : Peso de clasificación única de cada elemento en el nivel B

### 3.3.1. Matriz del juicio de la estructura determinada.

Para obtener el riesgo ambiental del agua, los niveles de factores seleccionados fueron: peligro (B1), exposición (B2), vulnerabilidad (B3) y gestión (B4) y los niveles de indicadores son los seleccionados en la matriz de riesgos, representados por la letra C. En la Tabla 11 se muestra el desglose de los niveles que se introducirán en las matrices de comparación de pares para obtener la prioridad de los elementos.

Tabla 11: Matriz de niveles de la evaluación de indicadores

Objetivo	Nivel de factores	Nivel de indicadores
<b>Riesgo ambiental del agua A</b>	Peligro (B1)	Descarga de aguas residuales (C1)
		Turismo excesivo (C2)
		Variabilidad Climática (C3)
		Cultivo excesivo de caña (C4)
	Exposición (B2)	Cuerpos de agua (C5)
		Población (C6)
		Agricultura (C7)
	Vulnerabilidad (B3)	Utilizar agua para consumo humano (C8)
		Utilizar agua para agricultura (C9)
		Utilizar agua para el turismo (C10)
	Gestión (B4)	Plantas de tratamiento de agua residual (C11)
		Planes ecoturísticos (C12)
		Planes agroindustriales (C13)
		Programa de desarrollo sostenible (C14)

En la comparación B1, la mayor puntuación se le otorgó a la descarga de aguas residuales, debido a que las concentraciones que se obtuvieron exceden el límite máximo permisible LMP (Giraldo, Problemática y propuesta para el manejo sostenible del río Tamasopo. (Tesis de maestría), 2013).

El cultivo excesivo de caña y el crecimiento de turistas impactan a las descargas de aguas residuales, siendo proporcionales ya que no hay una buena gestión de éstas. El valor más bajo se le otorgó a la variabilidad climática por las referencias de los índices de vegetación, SPI y evapotranspiración en las cuales no aparece un cambio significativo en las últimas décadas.

En la matriz B2, correspondiente a la exposición, el mayor valor lo obtuvo la población, ya que es la más afectada cuando se presenta un cambio en su entorno, principalmente cuando se trata de la degradación de recursos hídricos de los cuales son completamente dependientes. El valor más bajo se les otorgó a los cuerpos de agua por la capacidad de asimilación del agua, dado que la depuración del agua es un proceso natural que puede llevar cientos de años, por lo que las generaciones próximas padecerían de no contar con agua de calidad.

En la matriz B3, de vulnerabilidad, se seleccionó agua para agricultura como el factor más vulnerable, por las grandes cantidades de agua consumidas por los cañaverales. Si bien es cierto que los ejidos participan en la venta de caña, no son los principales beneficiados económicamente, en cambio, sí son los más afectados en concesionar cantidades exorbitantes del recurso a los grandes productores.

En la comparación de B4, en la gestión existen planes y programas para mejorar ciertos aspectos ambientales dentro de la cuenca, como es la reforestación, el financiamiento de más plantas de tratamiento y el manejo de residuos sólidos. En la matriz B4 el mayor valor lo obtuvo los planes de desarrollo sostenibles, debido a que los programas existentes no se realizaron de manera integral y no logran cubrir las necesidades desde el desarrollo sostenible.

A continuación, se muestra el análisis AHP que se realizó para cada nivel. Para esto se sumó los valores de cada columna y se dividió cada elemento de la matriz entre el total de su columna, obteniendo la matriz de comparaciones pareadas normalizada. Por último, se calculó el promedio de los elementos de cada reglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 1/2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 2 & 1 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 \\ 5 & 1 & 3 \\ 4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad B3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad B4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/9 \\ 2 & 1 & 2 & 1/5 \\ 3 & 1/2 & 1 & 1/7 \\ 9 & 5 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

La siguiente matriz (Tabla 12) es el resumen de las prioridades para cada alternativa. Se observa que el rango de CIF es menor a 0.1 por lo tanto, la asignación de importancia es congruente.

Tabla 12: Resultado de la matriz de prioridades

<b>Criterio</b>	<b>w1</b>	<b>w2</b>	<b>w3</b>	<b>w4</b>	<b>CIF</b>	<b>Total</b>
<b>B1</b>	0.59	0.18	0.13	0.10	0.06	0.216
<b>B2</b>	0.10	0.62	0.28		0.09	0.346
<b>B3</b>	0.16	0.54	0.30		0.01	0.337
<b>B4</b>	0.06	0.15	0.12	0.67	0.06	0.180
<b>Ponderación A</b>	0.15	0.32	0.47	0.1	0.07	

### 3.4. Resultados del Modelo del Índice de Riesgo Ambiental del Agua (WERI)

#### 3.4.1. Cálculo de índice del riesgo ambiental del agua

Para el cálculo del índice del riesgo ambiental del agua es necesario otorgar una variable a los componentes del riesgo y plantear la ecuación WERI de la cual se obtendrán los mapas de las zonas con mayor riesgo.

- **Peligro ambiental:** el grado de daño que puede causar un incidente de contaminación del agua (P).
- **La exposición ambiental al agua:** las personas, la economía, el ecosistema u otros bienes inmuebles que pueden verse afectados por la contaminación del agua (E).
- **La vulnerabilidad ambiental del agua:** grado de respuestas de las personas, la economía social y el medio ambiente ecológico (V).
- **La capacidad de gestión regional del medio ambiente del agua:** grado de gestión de la contaminación del agua por parte de un gobierno local (G).
- **WERI**=  $P^{VP} \times E^{VE} \times V^{VV} \times (1 - G)^{VG}$  ec 1.
- $P = \sum_{i=1}^n X_{pi} * V_{pi}$  ec 2.
- $E = \sum_{i=1}^n X_{ei} * V_{ei}$  ec 3.
- $V = \sum_{i=1}^n X_{vi} * V_{vi}$  ec 4.
- $G = \sum_{i=1}^n X_{gi} * V_{gi}$  ec 5.
- V es el valor de peso de cada indicador de evaluación obtenido de la ponderación de la matriz de riesgo. X es el valor cuantitativo de cada indicador de evaluación.

Para generar el modelo WERI se ingresaron los datos en ArcMap®, en raster calculator con el operador Power se ingresaron los datos obtenidos y se multiplicaron por los valores obtenidos en la matriz de comparaciones.

Al aplicar la fórmula, se generaron los mapas en los cuales se muestra el trabajo aplicado entre el Proceso Analítico Jerárquico y la implementación de los sistemas de información geográfico, generando los escenarios de análisis.

La importancia del cálculo del índice de riesgo ambiental del agua es su aplicación en la elaboración de los mapas que se analizan a continuación, ya que, se muestra el comportamiento de los principales peligros y se observa cómo están los índices de riesgo para los años de estudio en la cuenca del Río Gallinas.

### **3.5. Mapas temáticos describiendo el riesgo ambiental del agua**

#### **3.5.1. Análisis del peligro ambiental del agua**

El análisis del peligro ambiental del agua considera cuatro factores: descargas de agua residual, turismo excesivo, cultivo excesivo de caña y variabilidad climática. Estas variables se analizaron en un mapa de distribución. Los datos de descargas de agua residual se obtuvieron del Sistema Nacional de información (SINA/ Planta de tratamientos), y estos valores corresponden a la PTAR de Tamasopo, ya que era la única que contaba con información dentro de la cuenca. Se observa que en el transcurso del tiempo se incrementa el flujo tratado comenzando con valores de 1,5 l/s, 2,5 l/s, 5 l/s y 7,5 l/s respectivamente para cada año. El flujo tratado ha aumentado, pero igualmente como se ha descrito anteriormente también ha aumentado la carga de contaminantes en el agua residual por el crecimiento de los sectores económicos que predominan en la cuenca.

El dato de turismo excesivo se obtuvo de la información del Comité de Parajes Naturales certificados en la cuenca del río Tamasopo (Comité de parajes naturales certificados en la cuenca del Río Tamasopo, 2016). La afluencia de turistas a la zona aumenta en cada año 263975 (1990), 271551 (2000), 279358 (2010) y 287163 (2020) turistas, de manera que esta cantidad de visitantes se concentran en los tres sitios más importantes turísticamente dentro de la cuenca, los cuales son las cascadas de Tamasopo, Puente de Dios y Cascada de Tamuín. Puente de Dios es el sitio más visitado por ser el más accesible económicamente, la entrada al paraje cuesta 35 pesos mexicanos, aunque rentando chaleco y pagando estacionamiento el precio aumenta a 80 pesos. Es evidente

que el turismo empleado no es estratégico, los precios tan bajos degradan la importancia de estos cuerpos de agua.

La información del NDVI se utilizó para determinar el avance del peligro del cultivo de caña. A los mapas de NDVI se les multiplicó por el peso obtenido en la matriz de comparación, el resultado fue el aumento del peligro en las zonas de la ribera del río Tamasopo en la última década.

El valor cuantitativo de la variabilidad climática se dio por la evapotranspiración. El comportamiento de este peligro es diferente en los 30 años estudiados, a excepción de los valores más altos, los cuales se obtuvieron en la cascada de Tamuín.

En la Figura 23 se muestra, el análisis del peligro integral de los cuatro indicadores, se muestra que los puntos más afectados son la zona urbana del municipio de Tamasopo y la cascada de Tamuín, esto es debido a que la mayor actividad económica se da en estas áreas. Se aprecia que ocurre una disminución del área más afectada en los años 2010 y 2020.

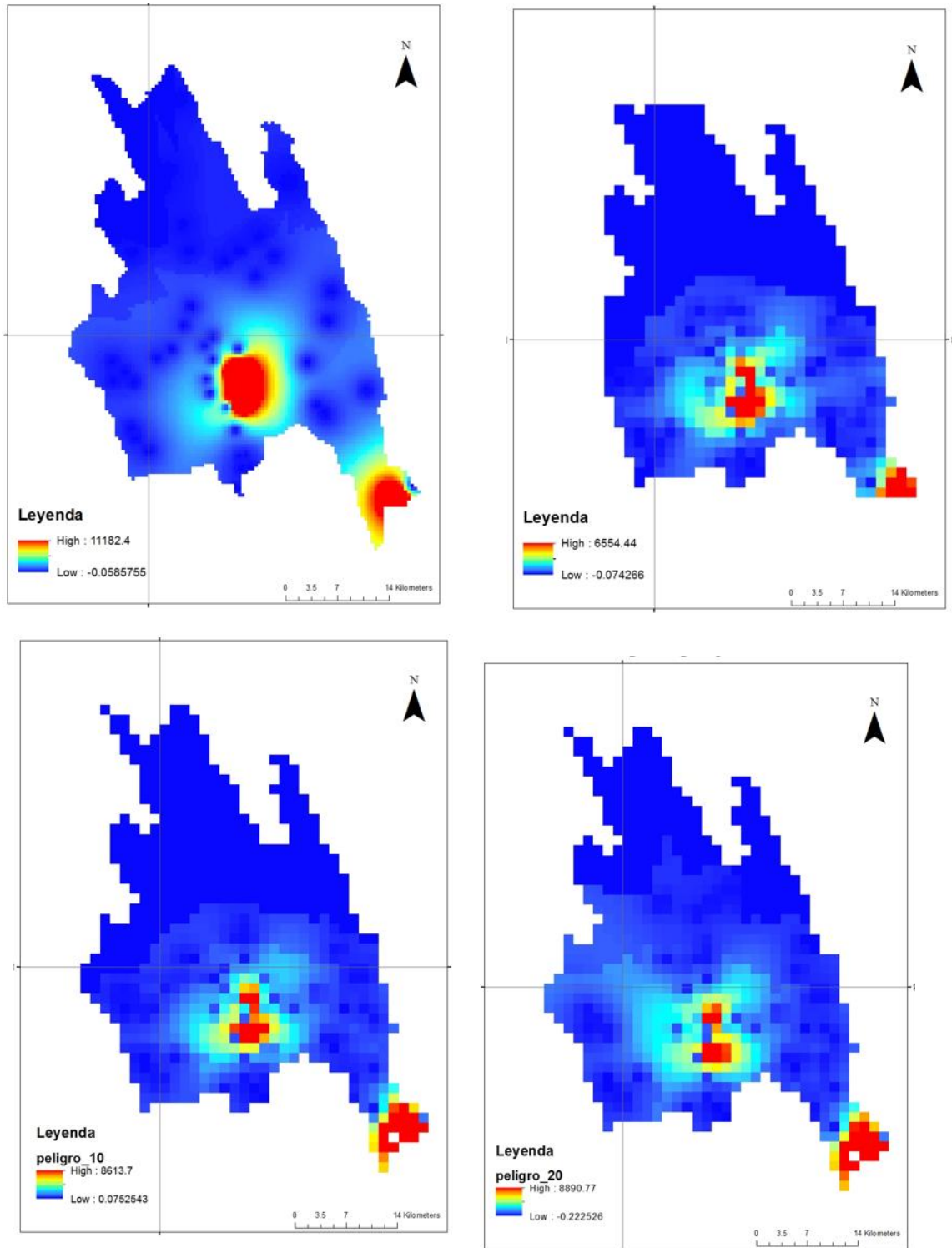


Figura 20. Distribución del peligro ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas 1990-2020

### **3.5.2. Análisis de la exposición ambiental del agua**

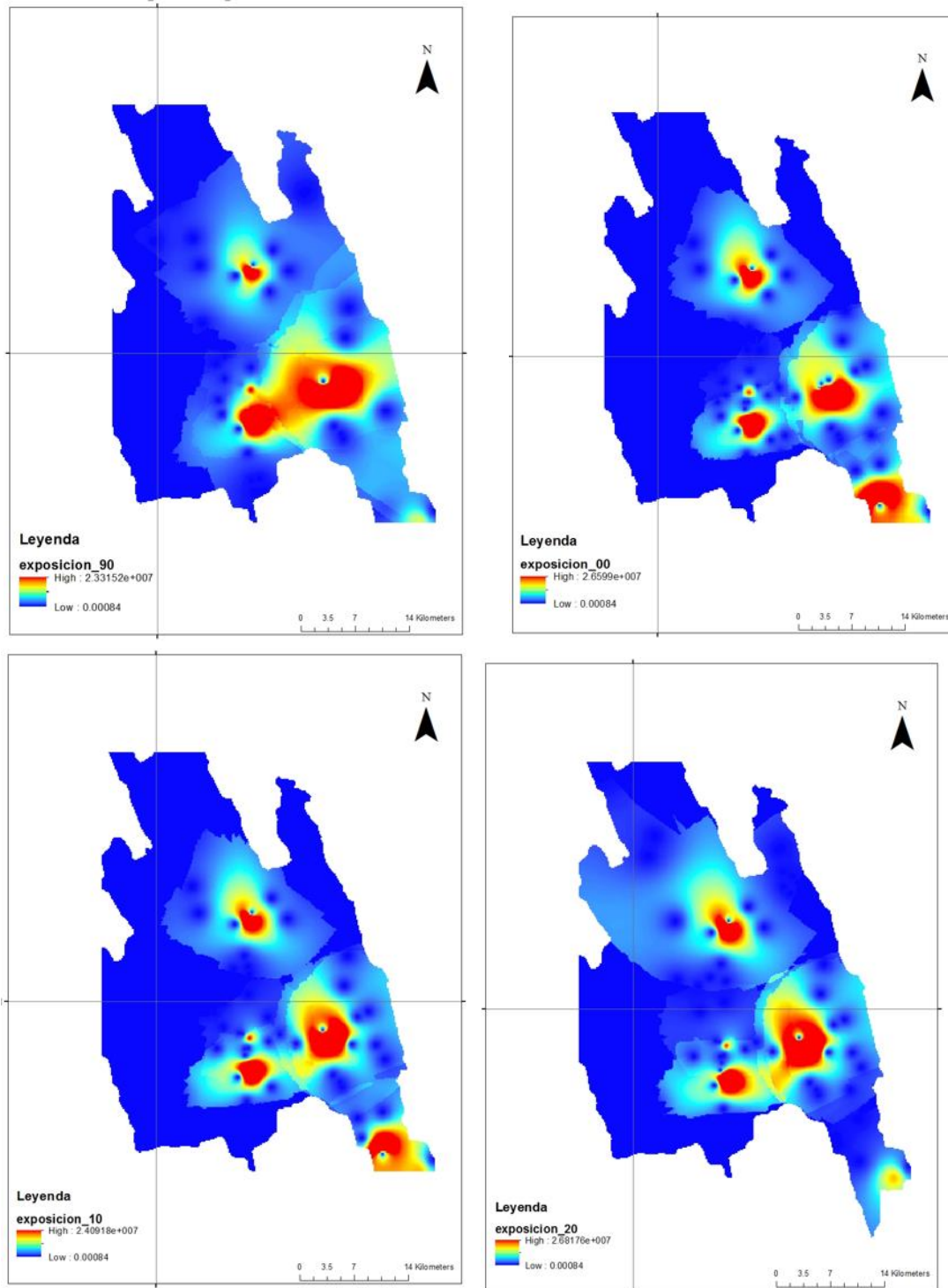
El término exposición se define como la acción de poner a alguien o a algo en la situación de sufrir un perjuicio o daño, por lo tanto, se seleccionaron tres factores que tuvieran un grado de afectación al riesgo ambiental del agua: los cuerpos de agua, la población y los agricultores.

Se analizó la dinámica (aumento o disminución) de los cuerpos de agua a través de imágenes satelitales. También se agregó valor a la trayectoria del Río Gallinas, para obtener información de la variación del río en los años de estudio. Los pequeños puntos en el mapa, figura 24, son los cuerpos de agua, se observa que no ha habido una variación significativa.

El valor cuantitativo de población se obtuvo a través de los censos de población del INEGI. En 1990 la población era de 14904 en la cuenca y en 2020 aumento a 15570 habitantes. En los años 1990, 2000 y 2010 la mayor población se encuentra en la zona alta de la cuenca, en cambio en la última década se observa una concentración de habitantes en el sur de ésta. La información de los agricultores también se obtuvo de los censos del INEGI.

La distribución espacial señala que la exposición al riesgo ambiental del agua ha aumentado. El valor que más ha impactado fue el aumento de la población dejando grandes áreas expuestas. Se puede observar en el mapa que las áreas más afectadas se ubican en la trayectoria del Río Gallinas y el río Tamasopo, incrementado en el año 2020 de manera drástica.





*Figura 21. Distribución de la exposición ambiental del agua 1990-2020*

### **3.5.3. Análisis de la vulnerabilidad ambiental del agua**

Se analizaron tres factores de vulnerabilidad: consumo de agua potable, consumo de agua por la agricultura y el consumo humano por el sector turismo, para determinar cómo se vulnera el agua en las principales actividades económicas en la cuenca.

Para el factor de vulnerabilidad consumo humano de agua se tomó el dato de SINA, Cobertura de acceso al agua por municipio, en el cual se observa que el mayor consumo de agua está en la zona urbana de Tamasopo.

Para obtener el dato del consumo de agua por agricultores se investigó la cantidad de agua que necesita el cultivo de caña y las áreas destinadas a la caña dentro de la cuenca.

El consumo de agua por turismo se calculó basándose en el consumo promedio de un turista (es el dato que se requiere obtener) por la cantidad de personas que visitan el área de estudio.

La vulnerabilidad del agua se ve afectada principalmente por el consumo del sector agrícola. Igualmente, se observa que los puntos más vulnerables se encuentran en el transcurso del Río Gallinas y Tamasopo principalmente en el sur de la cuenca. El gasto de agua por la agricultura ya es evidente en épocas de estiaje donde la cascada de Tamuín desaparece, trayendo repercusiones negativas al sector turismo.

La apertura de compuertas para riego de caña en Rayón, además de la geomorfología de la zona, permiten la vulnerabilidad de la cascada, siendo uno de los recursos hídricos más emblemáticos e importantes del estado.

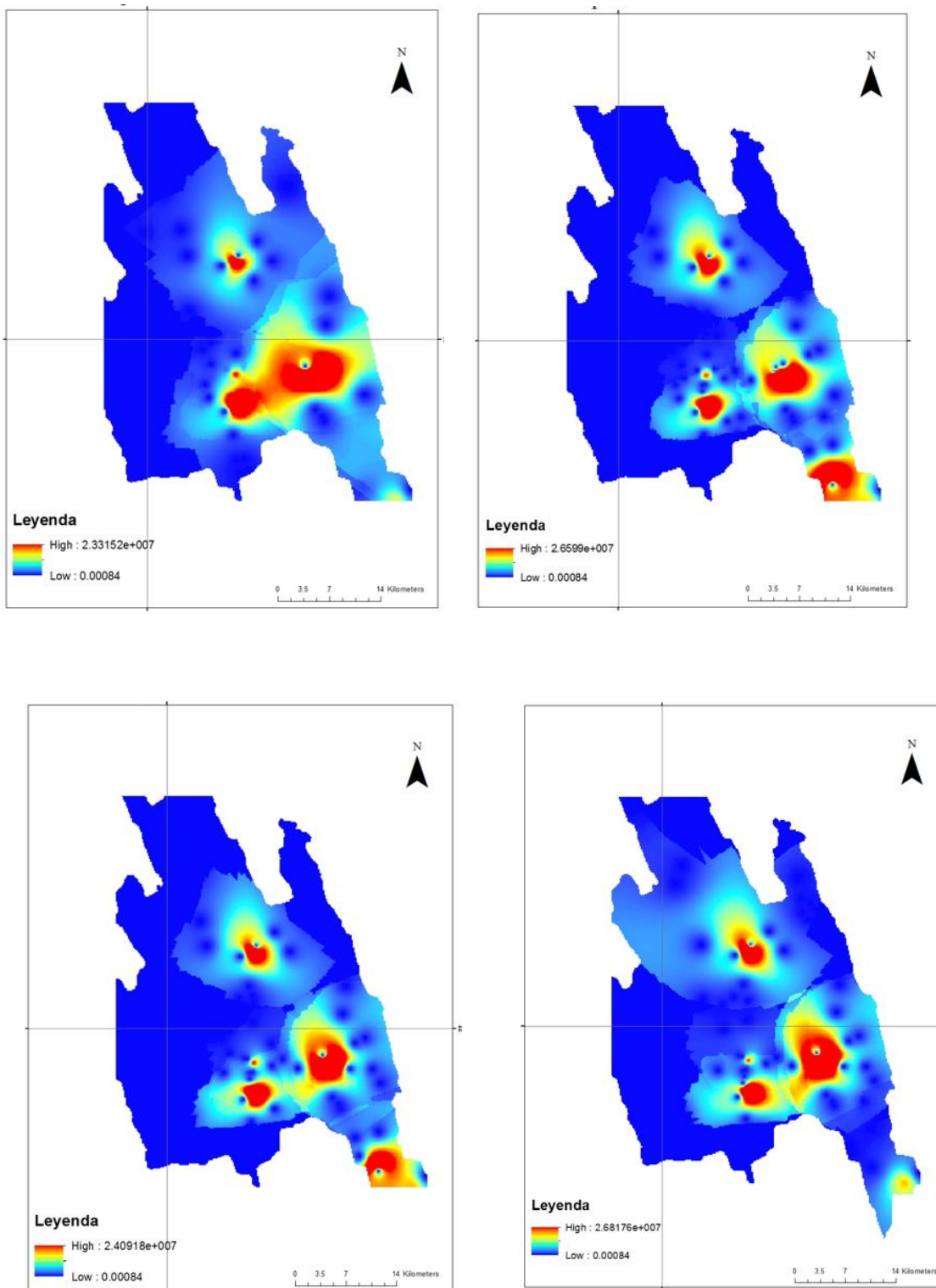


Figura 22. Distribución de la vulnerabilidad ambiental del agua 1990-2020

#### **3.5.4. Análisis del riesgo ambiental del agua**

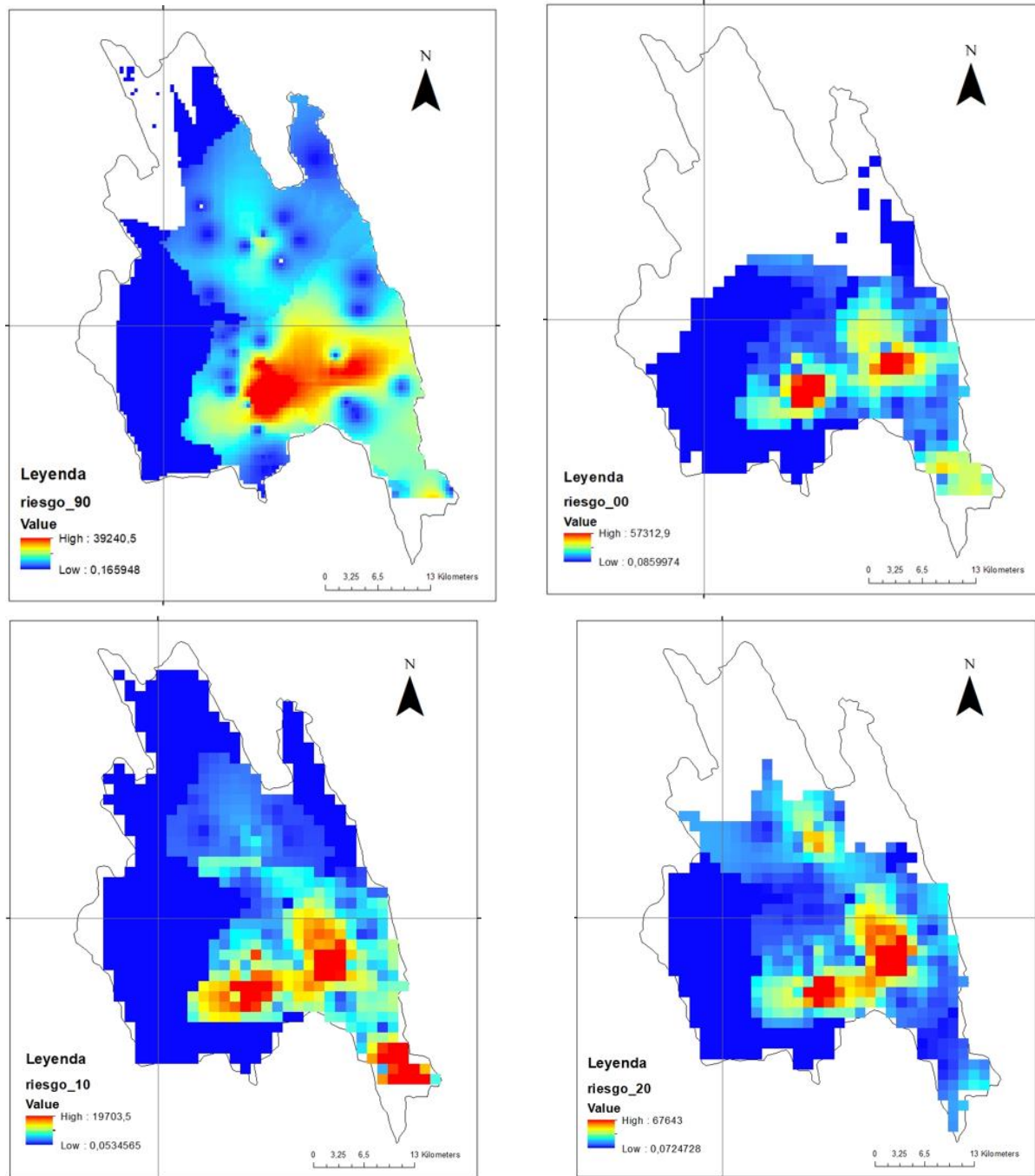
Para analizar el riesgo ambiental del agua se realizó un álgebra de mapas y se integró toda la información mostrada anteriormente, es decir, la información que se obtuvo para el análisis de peligro, exposición y vulnerabilidad y se utilizó ArcGis® para ingresar la fórmula de WERI.

Se puede observar en la Figura 23, que los valores de riesgo son muy altos en puntos específicos de la cuenca, como es en la zona urbana de Tamasopo y los alrededores de la cascada de Tamuín, lo que provoca una distorsión en los datos en los puntos más alejados. El riesgo en esta zona es alto por la mayor población, mayor afluencia de turistas y los cañaverales presentes en Tamasopo.

Cabe aclarar que las zonas sin color en los mapas se dan por la falta de datos en estas áreas, la cual pertenece a la zona alta de la cuenca que es la parte montañosa y sin tanta intervención humana. La información más completa se encontró en Tambaca y municipios aledaños. Gran parte de la cuenca por el momento no se ha sobrepoblado, ni sobreexplotado como las grandes urbes que cambian completamente el paisaje.

Se puede apreciar que hubo un aumento del riesgo desde 1990 al 2020, aunque se han implementado acciones dentro de la cuenca, aun así, la carga a la que es expuesta sobrepasa la aplicación de medidas o bien éstas sigue siendo insuficientes para atenuar el riesgo del agua, por lo tanto, la gestión regional es inversamente proporcional al aumento del riesgo ambiental del agua.

El riesgo ambiental estuvo determinado principalmente por las variaciones de los peligros, la exposición y la vulnerabilidad, ya que los pesos presentaron valores altos.



*Figura 23. Distribución del riesgo ambiental del agua 1990-2020*

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL RIESGO AMBIENTAL DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO GALLINAS A TRAVÉS DE REPRESENTACIÓN POR SERIES DE TIEMPO**

### **4.1. Elementos sobre el modelado de la distribución espacial y sus aplicaciones en el manejo de recursos naturales.**

Las series temporales presentan un conjunto de datos ordenados cronológicamente que a través de estadísticas pueden estudiar, analizar y modelizar el comportamiento de una problemática o evento a lo largo del tiempo. Las series de tiempo permiten obtener un mejor conocimiento de una variable sobre el tiempo, analizar el presente para predecir el futuro de la misma (Correa, 2000).

Las series de tiempo en la aplicación hídrica se ven reflejadas en:

- Registros históricos de datos hidrométricos y de aforo.
- Lluvia recogida diariamente en una localidad.
- Temperatura media mensual.
- Gestión de cuencas.

### **4.2. Manejo de variables para la generación de series de tiempo**

El monitoreo del riesgo ambiental del agua a través del tiempo es relevante en los sectores económicos y las autoridades ambientales pertinentes, ya que tiene una relación directa con la calidad de vida, economía y sostenibilidad de los recursos naturales.

El aumento del riesgo está asociado al incremento de la población y de actividades antropogénicas que benefician medianamente a la economía de los habitantes de la cuenca, sin embargo, el aumento de estas actividades disminuirá la calidad de los recursos hídricos si no se toma en cuenta la gestión integral.

Las series de tiempo se realizaron con Excel Previsión, en el cual se analizó los patrones de los datos más significativos que impactan en el riesgo ambiental del agua y presentados en gráficas de proyección de 5, 10 y 15 años.

El análisis se realizó con el comportamiento del crecimiento poblacional, la extracción de agua para agricultura y consumo humano, ya que son los factores que más afectan en la cuenca del Río Gallinas.

Con los datos obtenidos de las décadas estudiadas se puede hacer una previsión, esto ayuda a predecir los comportamientos de los peligros estudiados (Microsoft, 2022). En esta función, Excel crea una nueva hoja de cálculo con una tabla de los valores históricos y pronosticados, los cuales son presentados en un gráfico.

El crecimiento de la población tiene una relación directa con los recursos hídricos, ya que todas las actividades que se desarrollan tienen implícito o explícito el agua como parte de su proceso, a su vez dichas actividades se realizan para solventar una necesidad humana.

Por esto, la demografía de la cuenca es un factor fundamental, no solo por el crecimiento, sino también a través de las personas que realizan procesos sociales del uso, manejo y conservación del recurso.

La relación del agua- agricultura en México fomentó las bases de las culturas prehispánicas con tecnologías como jagüeyes, cisternas, pozos, acueductos subterráneos (Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), 2009). El peso del crecimiento de la población demanda mayor cantidad de alimentos y por ende el gasto de agua para riego es mayor. La extracción de agua para la agricultura es el principal uso del recurso en México, el cual se utiliza para riego de cultivos. El riego de origen superficial para el 2008 fue de 40.7 miles de millones de metros cúbico, esto representa el doble del agua subterránea que se extrae (Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), 2010).

El consumo humano es una actividad proporcional del crecimiento poblacional, ocasionándole mayor presión de abastecimiento al recurso de calidad, aunque también representa un derroche del recurso para la población más adinerada, ya que mayor gasto de agua al día brinda mayor estatus social.

### 4.3. Series de tiempo para representar los riesgos ambientales del agua en los próximos 5, 10 y 15 años

Teniendo valores históricos se pueden realizar predicciones del comportamiento a futuro de las variables.

Para cada predicción es necesario tener la cantidad de periodos, en este caso son los años de apertura de las décadas 1990, 2000, 2010 y 2020 más el alcance a pronosticar, aunque estos modelos se adaptan mejor en periodos cortos de tiempo por la proximidad de los datos (Méndez, 2013) .

El alcance será a mediano y largo plazo para visualizar el comportamiento de las tres variables seleccionadas y así tener una perspectiva del avance del riesgo ambiental del agua.

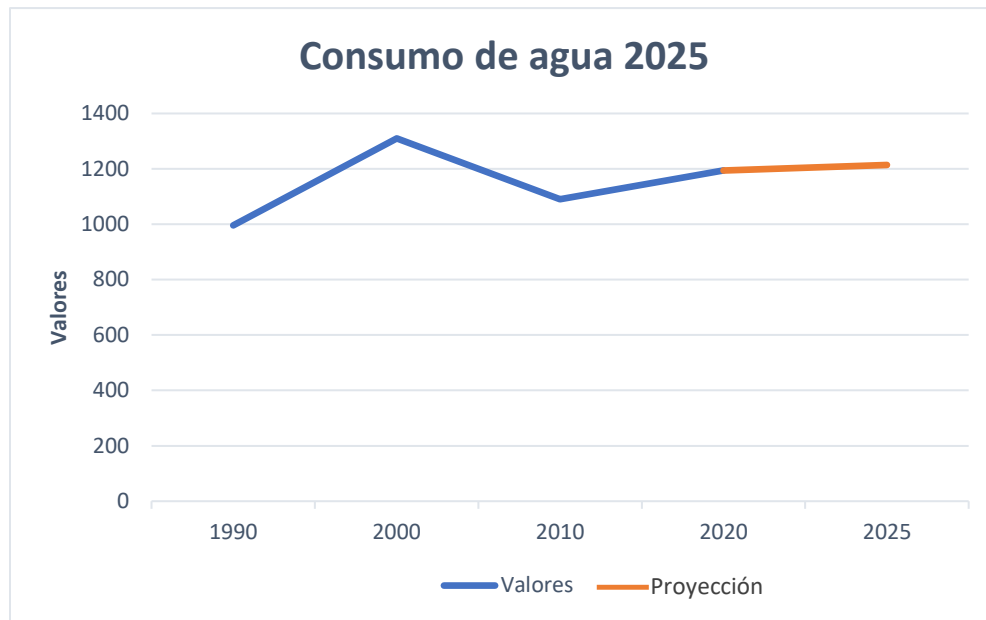
En las siguientes gráficas se muestran los datos proyectados del consumo de agua por la población, teniendo en cuenta el crecimiento demográfico.

#### 4.3.1. Consumo de agua en los próximos 5, 10 y 15 años

Tabla 13: Consumo de agua año 2025

<b>Escala de tiempo</b>	<b>Valores (I)</b>	<b>Proyección (I)</b>
1990	996	
2000	1,310	
2010	1,090	
2020	1,194	1,194
2025		1,214.07





*Figura 24. Gráfica consumo de agua año 2025*

En la tabla 13 y la figura 24 se presenta el consumo de agua desde 1990 y la previsión para el año 2025. Se puede observar que el consumo de agua se incrementó desde 1990 hasta el año 2000 en un 31.5%. Luego ese consumo empieza a decrecer en los siguientes 10 años en un 16.8%, sin lograr alcanzar el consumo de 1990. Sin embargo, aunque a un ritmo más lento de crecimiento, vuelve a incrementarse en la siguiente década hasta alcanzar los 1194 litros.

Se prevé que para 2025 el consumo de agua siga incrementándose hasta alcanzar 1214.0675 litros, lo que corresponde a un incremento del 1,7% con respecto al 2020, por la aglomeración de población en el área urbana de Tamasopo.

En la tabla 14 y figura 25 se observa la previsión del consumo de agua para el año 2030, la cual sigue la tendencia de crecimiento de las décadas anteriores, hasta alcanzar los 1245.03676 litros. lo cual equivale a un incremento del 4,3% con respecto al 2020.

Tabla 14: Consumo de agua año 2030

Escala de tiempo	Valores	Proyección
1990	996	
2000	1,310	
2010	1,090	
2020	1,194	1,194
2030		1,245.04

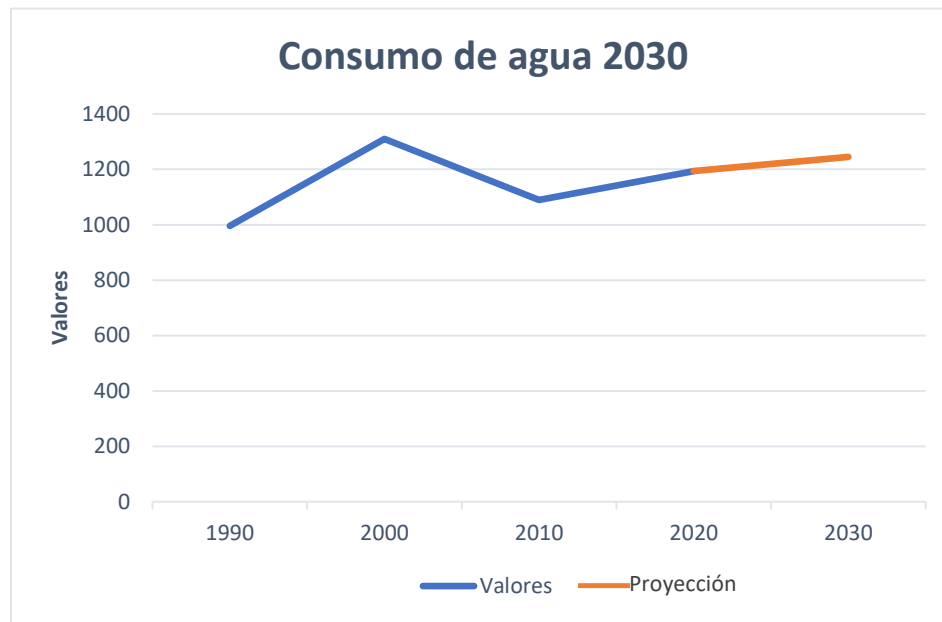


Figura 25. Gráfica consumo de agua año 2030

Continuando con las previsiones del consumo de agua para el 2035 (Tabla 15 y figura 26) este aumentaría hasta alcanzar un incremento del 2,5% con respecto al 2030 y en un 7% con relación al 2020.

Resumiendo, se puede observar que entre los años 1990 y 2000 el consumo de agua se incrementó de forma acelerada, disminuyendo de la misma forma entre 2000 y 2010 para volver a crecer del 2010 al 2020 pero de una forma más lenta, siguiendo las previsiones esa misma tendencia hasta alcanzar en 2035 valores cercanos a los alcanzados en el año 2000.

Tabla 15 Consumo de agua año 2035

Escala de tiempo	Valores	Proyección
1990	996	
2000	1,310	
2010	1,090	
2020	1,194	1,194
2030		1,245.04
2035		1,276.01

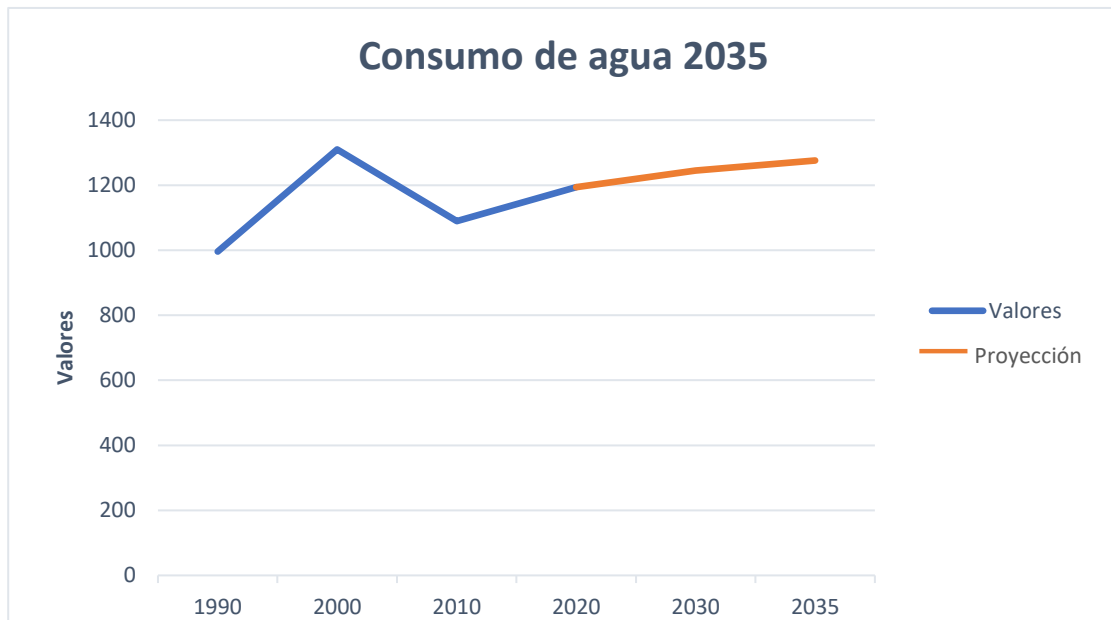


Figura 26. Gráfica consumo de agua año 2035

#### 4.3.2. Crecimiento poblacional en los próximos 5, 10 y 15 años

En la tabla 16 y gráfica 27 se presenta el crecimiento poblacional y su previsión para el año 2025. El crecimiento poblacional aumentó desde 1990 hasta 2010 en un 4% y en los siguientes 10 años se incrementó 2% con respecto al 2010.

Se prevé que para el 2025 sufra un aumento del 0.9% con respecto al 2020, el cual no es un incremento muy significativo en esos cinco años, pero en comparación con el año 2000 creció en

un 5.6% y con respecto a 1990, fue de 6.7%, el cual si representa un gran crecimiento a como se observa en la figura 30.

Tabla 16. Crecimiento poblacional año 2025

Escala de tiempo	Valores	
Año	Habitantes	Proyección
1990	14,904	
2000	15,068	
2010	15,483	
2020	15,764	15,764
2025		15,908



Figura 27. Gráfica crecimiento poblacional año 2025

En la tabla 17 y figura 28 se muestra la proyección para el 2030 del crecimiento poblacional, llegando a alcanzar un incremento de 1.8% y 7.7% con respecto a 2020 y a 1990 respectivamente.

Tabla 17. Crecimiento poblacional año 2030

Escala de tiempo	Valores Habitantes	Proyección Habitantes
1990	14,904	
2000	15,068	
2010	15,483	
2020	15,764	15,764
2030		16,052

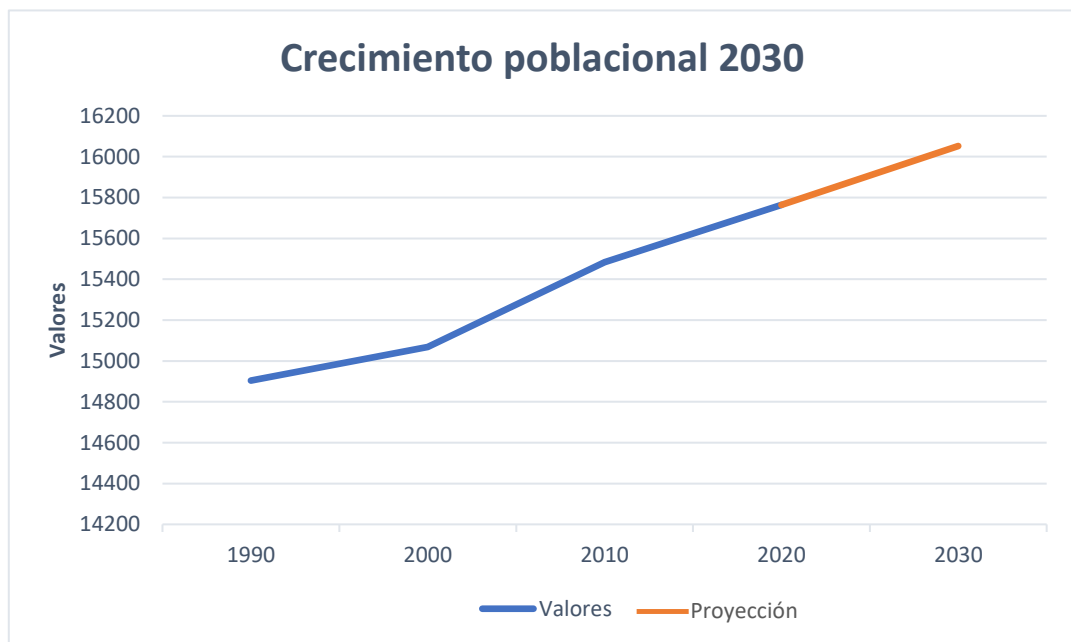


Figura 28. Gráfica crecimiento poblacional 2030

En la tabla 18 y en la figura 29 se observa que para el 2035 el crecimiento poblacional alcanzaría los 16195 habitantes, lo que corresponden a un incremento del 2.7%, 7.5% y 8.7% con relación a los años 2020, 2000 y 1990 respectivamente. Este significativo aumento de la población conlleva un incremento en el consumo de agua.

Tabla 18. Crecimiento poblacional año 2035

Escala de tiempo	Valores	Proyección
1990	14,904	
2000	15,068	
2010	15,483	
2020	15,764	15,764
2030		16,052
2035		16,195

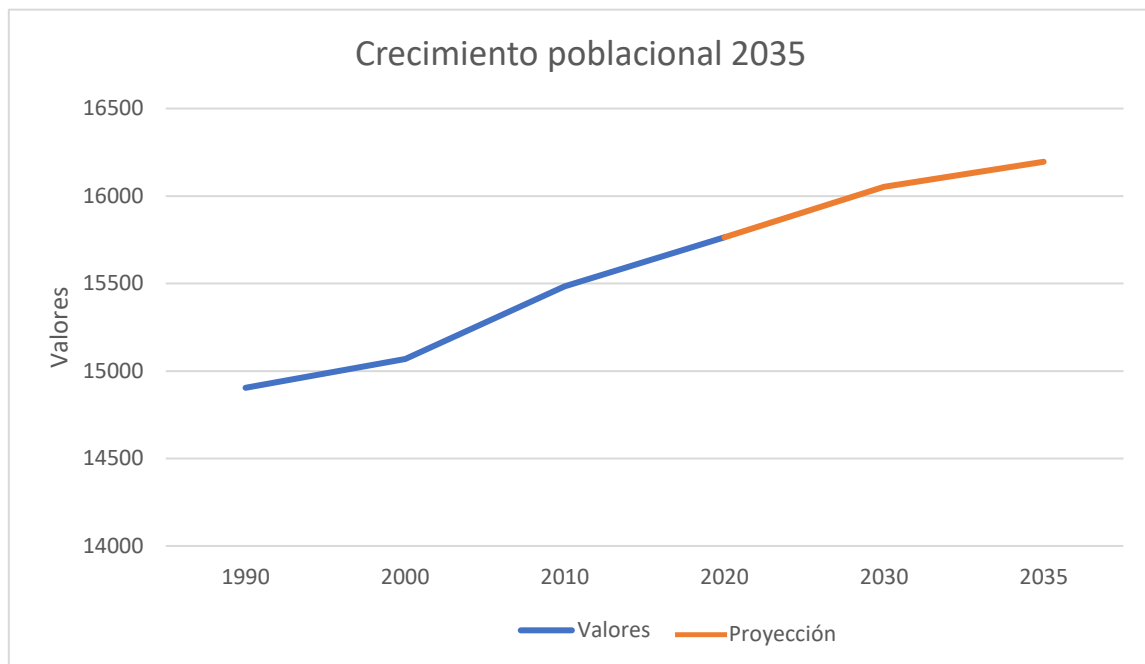


Figura 29. Gráfica crecimiento poblacional 2035

#### 4.3.3. Consumo de agua para la agricultura en los próximos 5, 10 y 15 años

En las tablas y figuras que se presentan a continuación, se puede observar el comportamiento del consumo de agua para la agricultura, el cual varía de creciente y decreciente entre los años 1990 y 2020. También se puede observar la previsión para los años 2030 a 2035.

En la tabla 19 y figura 30 se puede observar que el consumo de agua para la agricultura entre 1990 y 2000 sufrió un incremento del 18.7% y en la siguiente década tuvo un decremento significativo de 12.9% con respecto al 2000, pero con relación a 1990 tuvo un crecimiento de 3.4%. Sin embargo, para el 2020 vuelve a crecer el consumo de agua en 19.1% con respecto al 2010 y en un 23.2% en relación con 1990. Esto significa que, aunque en la gráfica se observa un crecimiento y decrecimiento entre cada década, no obstante, comparando su comportamiento con el año 1990 ha sido de continuo crecimiento.

Para el año 2025 se prevé un incremento del 1.1% con respecto al año 2000 y del 20% con relación a 1990.

Tabla 19. Agua para agricultura año 2025

Escala de tiempo	Valores (L)	Proyección (L)	Límite de confianza inferior (L)	Límite de confianza superior (L)
1990	160,815,000			
2000	190,920,000			
2010	166,350,000			
2020	198,150,000	198,150,000	198,150,000.00	198,150,000.00
2025		192,984,863.1	174,657,852.06	211,311,874.08

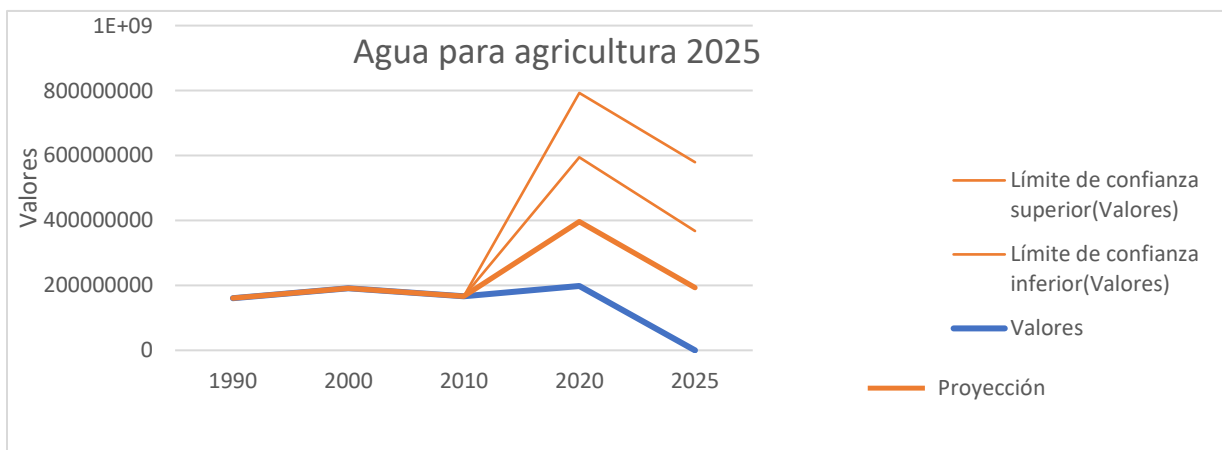


Figura 30. Gráfica Agua para agricultura año 2025

En la tabla 20 y figura 31 se presenta la previsión del consumo de agua para agricultura para el año 2030, la cual muestra un incremento del 18.8%, 3.5% y 22.9% con respecto a los años 2010, 2000 y 1990 respectivamente.

Tabla 20. Agua para agricultura año 2030

Escala de tiempo	Valores (L)	Proyección (L)	Límite de confianza inferior (L)	Límite de confianza superior (L)
1990	160,815,000			
2000	190,920,000			
2010	166,350,000			
2020	198,150,000	198,150,000	198,150,000.00	198,150,000.00
2030		197,578,964.1	171,660,656.57	223,497,271.63

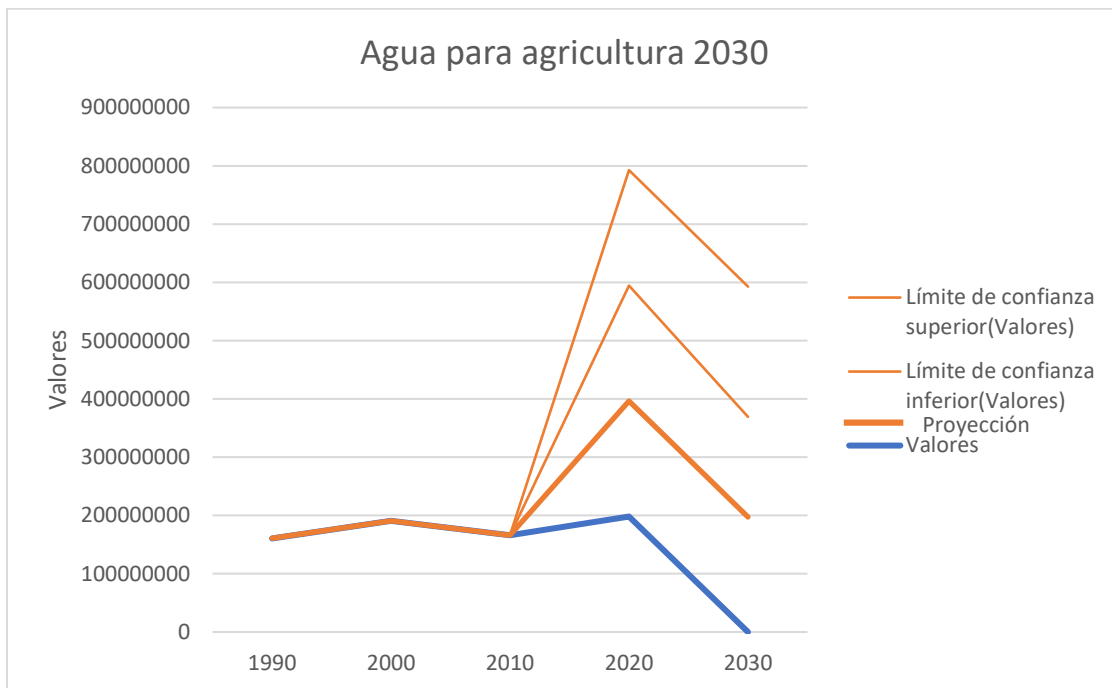


Figura 31. Gráfica Agua para agricultura año 2030



Para el año 2035 se prevé un crecimiento del 2% con relación al 2020, 5.9% con respecto al 2000 y 26% en comparación con el año 1990, a como se puede observar en la tabla 21 y en la figura 32.

En síntesis, se observa que el agua para la agricultura aumenta el consumo entre los años 1990 y 2000, luego disminuye entre 2000 y 2010 y vuelve a incrementarse entre 2010 y 2020 hasta alcanzar valores aproximados a los alcanzados en el año 2000 y mantenerse con un crecimiento poco significativo en las previsiones hasta 2035, aunque con respecto a 1990 sea un aumento importante.

Tabla 21. Agua para agricultura año 2035

Escala de tiempo	Valores (L)	Proyección (L)	Límite de confianza inferior (L)	Límite de confianza superior (L)
1990	160,815,000			
2000	190,920,000			
2010	166,350,000			
2020	198,150,000	198,150,000	198,150,000.00	198,150,000.00
2030		197,578,964	171,660,656.57	223,497,271.63
2035		202,173,065	176,254,699.29	228,091,430.97

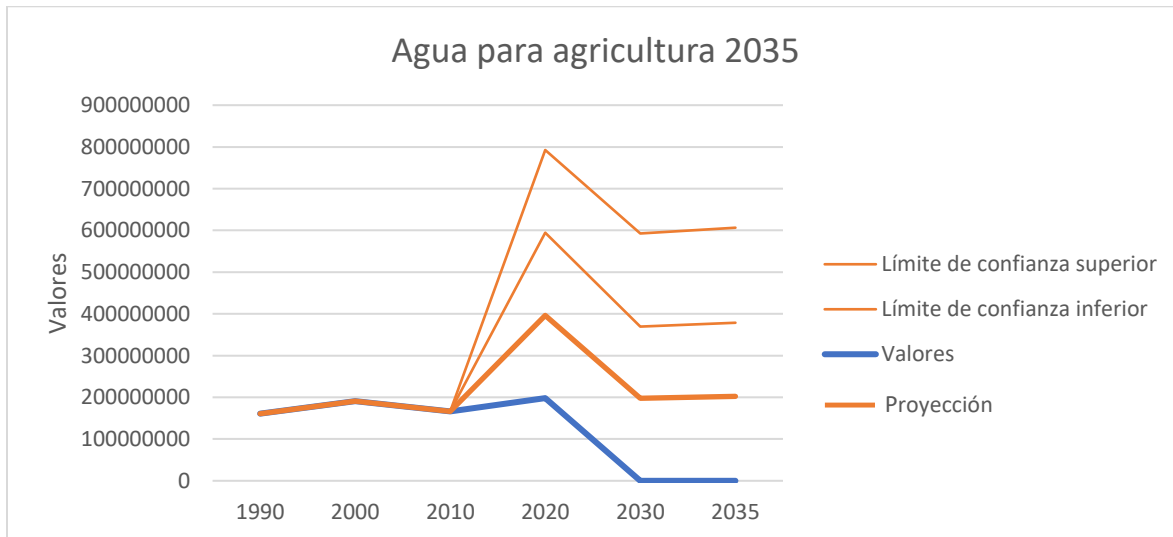


Figura 32. Gráfica Agua para agricultura año 2035

Como se ha podido observar, el incremento en el consumo de agua es debido al aumento de consumo de agua poblacional y al consumo de agua para la agricultura. En el año 2000 se presenta el valor más alto de consumo de agua, lo que se debe principalmente a un fuerte incremento en el consumo del sector agrícola, por el cultivo de caña de azúcar. Además, en la zona sur de la cuenca la selva ha sido desplazada por la producción agrícola.

Al mismo tiempo, se ha incrementado el consumo de agua por el crecimiento de la población. En los años 1990 a 2010 este crecimiento se dio especialmente en la zona alta de la cuenca, sin embargo, para el 2020 la población creció hacia el sur de la cuenca. Por otra parte, el consumo humano no solo está limitado por el crecimiento poblacional, también influye el incremento del flujo de turistas que ha crecido de forma exponencial entre los años 1990 al 2020.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Di, Liu, Zhang, Tong, Ji (2018), implementaron en su metodología el índice del riesgo del agua aplicado en la cuenca del río Yinma en China. Dicho proceso se estableció para medir la variación del riesgo ambiental del agua en ese río, a través de un modelo de distribución espacial, del cual desarrollaron mapas de riesgo del año 2000 al 2015.

Habiendo retomado, la idea de la metodología del trabajo de investigación precedente, y con la revisión bibliográfica del estado del arte sobre la temática, establecimos una adaptación de diversas variables y elementos del riesgo, según las condiciones de la zona de estudio que se estableció para este proyecto de tesis.

Para la realización de este trabajo se adaptó la metodología en la cuenca del Rio Gallinas, partiendo de la revisión de la problemática global y específica del área de estudio, así como la recopilación de datos meteorológicos, climáticos, geográficos, hidrológicos, de población, gastos de agua, área de cultivo, indicadores económicos, sociales y ambientales. Los datos obtenidos se analizaron para realizar la matriz de evaluación de riesgos.

A través de la matriz de evaluación de riesgo, se determinaron las variables de los componentes del riesgo ambiental del agua para cada uno de los factores: peligro, exposición, vulnerabilidad y gestión.

Las variables del *factor peligro* fueron: la descarga de aguas residuales, debido a las concentraciones del LMP que se encontraron, seguidas del cultivo excesivo de caña y el crecimiento de turistas debido al fuerte impacto que estos tienen en las descargas de aguas residuales y, por último, está la variabilidad climática.

Las variables del *factor exposición* fueron: la población, que es la más afectada al degradarse los recursos hídricos, seguida por la agricultura y la menos afectada son los cuerpos de agua por su gran capacidad de asimilación.

El factor *vulnerabilidad* presenta como variable más representativa el agua para la agricultura por las grandes cantidades consumidas por los cañaverales.

En el nivel *factor de gestión* la variable con mayor valor es los planes de desarrollo sostenibles, debido a que los programas existentes no se realizaron de manera integral cubriendo las necesidades desde el desarrollo sostenible.

Para calcular el índice del riesgo ambiental del agua (water environmental risk index) se planteó la ecuación WERI, y para ello se les asignó una variable a los componentes del riesgo: peligro, exposición, vulnerabilidad y gestión.

Al plantear la ecuación para estimar el índice de riesgo ambiental del agua, por medio de tecnologías espaciales se estableció un proceso de interpolación espacial a fin de generar diversos mapas en los cuales se muestra el trabajo aplicado entre el Proceso Analítico Jerárquico y la implementación de los Sistemas de Información Geográfico (SIG), procesos que permitieron que los parámetros de la ecuación WERI generará la distribución espacio temporal de nuestro fenómeno de análisis.

Al realizar un análisis combinado con los pesos ( $w_k$ ) obtenidos en la matriz para cada factor, se observa que el riesgo ambiental del agua estuvo determinado principalmente por las variaciones de los peligros, la exposición y la vulnerabilidad, ya que los pesos presentaron valores mayores. El valor de cada peso debe estar entre 0 y 1.

En el análisis del peligro se muestra en los resultados de los mapas que los puntos más afectados son la zona urbana del municipio de Tamasopo y la cascada de Tamuín, aunque hay una disminución del área más afectada en los años 2010 y 2020. La variable de este factor con mayor peso fue las descargas de aguas residuales con un peso de 0.59.

Para determinar el avance del peligro del cultivo de caña (uno de los peligros más latentes) se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el peso obtenido en la matriz de la evaluación de riesgo, por lo que el resultado fue el aumento del peligro en las zonas de la ribera del río Tamasopo en la última década. En los años 1990, 2000 y 2010 se observa valores de NDVI bajos en las ciudades de Tamasopo, Agua Buena y Tambaca por los cultivos de caña de azúcar que abastecen al ingenio Alianza Popular localizado en esta última.

Según Aragón y otros, (2013), entre los años 2000 a 2010 la zona huasteca fue la más afectada por la deforestación en los municipios de Aquismón, Tamasopo, Tamuín y Ciudad Valles, debida a la

agricultura temporal y en esta zona hay siete ingenios para abastecer la agroindustria azucarera: Aquismón, Ciudad de Maíz, Ciudad Valles, el Naranjo, Tamasopo, Tamuín y Tanlajás y San Luis Potosí que ocupa el tercer lugar nacional en producción de caña de azúcar (Arcudia, Azuara, Flores, y Espinosa, 2018).

El Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) en el año 2010 presentó los valores más bajos en el área del río Tamasopo donde imperan los cultivos de caña de azúcar por la cercanía al ingenio Alianza Popular. También se encuentran valores muy altos de radiación solar en el Río Gallinas y en el Río Tamasopo, los cuales coinciden con la baja humedad presentada en el NDWI.

Para analizar la variabilidad climática se utilizaron los índices de vegetación, el índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y la evapotranspiración (ET). La distribución espacial obtenida por los índices NDVI y NDWI muestra un cambio de uso de suelo en la ribera del Río Gallinas, y en la zona más elevada se muestra una vegetación menos estresada hídricamente o una recuperación de bosque.

Los valores más altos de evapotranspiración a lo largo del periodo de estudio se encontraron en Tamuín y los valores más bajos en Cerritos. Los datos de 1990 a 2020 tienen similitud por lo que la evapotranspiración no ha variado en los últimos 30 años.

Las precipitaciones para febrero de 2010 estuvieron por encima de la media, en 1999 hubo sequías generalizadas en el altiplano potosino y la zona media. El SPI de febrero 2020 fue moderadamente seco, los valores oscilan entre -0.3 y -1.1, por lo que es el año que presenta menos precipitación.

Combinando los resultados de los índices de vegetación, SPI y la evapotranspiración con el peso, el cual es de 0.13, se obtiene que la variabilidad climática como peligro natural no es representativo.

La distribución espacial señala que la exposición al riesgo ambiental del agua ha aumentado, siendo el valor mayor el incremento de la población, con un peso de 0.62, lo cual deja muchas áreas expuestas. Se puede observar en el análisis de la distribución espacial de los resultados en el mapa, que las áreas más afectadas se ubican en la trayectoria del Río Gallinas y el río Tamasopo,

incrementándose en el año 2020. En los años 1990 a 2010 este crecimiento se dio especialmente en la zona alta de la cuenca, sin embargo, para el 2020 la población creció hacia el sur de la cuenca.

La vulnerabilidad del agua se ve afectada principalmente por el consumo del sector agrícola, que tiene un peso de 0.54. Igualmente, se observa en el análisis espacial a través de los mapas que los puntos más vulnerables se encuentran en el transcurso del Río Gallinas y Tamasopo. El gasto de agua por la agricultura ya es evidente en épocas de estiaje, además la apertura de las compuertas para riego de caña en Rayón y sumado a esto, el tipo de geología de la zona permite la vulnerabilidad de la cascada de Tamuín, que es uno de los recursos hídricos más representativos e importantes del estado, la cual desaparece en tiempos de sequía, trayendo consecuencias negativas al sector turismo.

Giraldo (2013), en su trabajo presenta que el alto consumo de agua por parte del sector agrícola causa que el flujo superficial de los cuerpos hídricos disminuya en esta zona y pone como caso relevante que la cascada de Tamul se secó en 2013 debido al excesivo riego de los campos cañeros, afectando el turismo.

Relativo a lo descrito precedentemente, en la gestión existen planes y programas para mejorar ciertos aspectos ambientales dentro de la cuenca, como es la reforestación, el financiamiento de más plantas de tratamiento y el manejo de residuos sólidos, sin embargo, los programas existentes no se han realizado de manera integral y no logran cubrir las necesidades desde el desarrollo sostenible, dado que los planes de desarrollo sostenible tienen un peso de 0.67.

Los valores de riesgo son muy altos en puntos específicos de la cuenca, como es en la zona urbana de Tamasopo y los alrededores de la cascada de Tamuín. Dado que se acrecentó un aumento del riesgo en la cuenca desde 1990 al 2020.

Al comparar los resultados con el trabajo de Di, Liu, Zhang, Tong, Ji (2018), en dicho estudio el riesgo ambiental había disminuido en el periodo 2000 - 2015 por las gestiones realizadas, mientras que en nuestro análisis en la cuenca del Río Gallinas, los planes de desarrollo sostenible no han logrado disminuir los riesgos.

El cálculo del Producto Interno Bruto (PIB) en la zona de estudio muestra la necesidad de la población en aumentar las actividades económicas. Esto concuerda con el análisis espacial del

cultivo excesivo de caña, en el cual las hectáreas destinadas cada década van en aumento. De igual manera el turismo de ciertos lugares de la cuenca se ha incrementado, llegando a ser invasivo en época de verano, Semana Santa y vacaciones decembrinas. A esto los pobladores le han sacado ventaja y han creado múltiples negocios en torno a estos lugares.

El crecimiento de la población está relacionado con los recursos hídricos, porque todas las actividades que se desarrollan tienen implícito o explícito el agua como parte de su proceso, y se realizan para resolver una necesidad humana.

Así mismo, se realizó un análisis del comportamiento del crecimiento poblacional, la extracción de agua para agricultura y consumo humano, que son los factores que más afectan la cuenca del Río Gallinas, con series de tiempo y proyecciones de 5,10 y 15 años. De manera que el incremento en el consumo de agua es debido al aumento de consumo de agua poblacional y al consumo de agua para la agricultura.

En el año 2000 se presentó el valor más alto de consumo de agua, lo que se debe principalmente a un fuerte incremento en el consumo del sector agrícola, por el cultivo de caña de azúcar. Además, en la zona sur de la cuenca la selva ha sido desplazada por la producción agrícola.

Por otra parte, el consumo humano no solo está limitado por el crecimiento poblacional, también influye el incremento del flujo de turistas que ha crecido entre los años 1990 al 2020. Los cinco sitios turísticos más visitados se ubican en cascadas o saltos de agua, entre ellos está la cascada de Tamul, las cascadas de Tamasopo, y Puente de Dios, Tamasopo, siendo el principal atractivo turístico los cuerpos de agua (Vargas, Güemes, Güemes, y Almegua, 2018). El 95.2% de la demanda de los turistas en la región Huasteca es en cuerpos de agua y el 85% corresponde a cascadas. Entre los principales sitios turísticos de la Huasteca Potosina se encuentra la subcuenca del Río Gallinas.

Finalmente, se señala que todas las actividades antropogénicas conllevan un impacto en el medio ambiente, en este caso los recursos hídricos de la cuenca reciben este impacto en forma de lixiviación y escorrentía de agroquímicos, descargas sólidas (basura), interrupción de caudal de agua para desviarlo a las zonas agrícolas cañeras, la carga masiva de turistas, entre otras.

Por lo tanto, se recomienda tanto a las instancias que gobiernan el recurso hídrico en la entidad (CONAGUA, COTAS, CEA, Organismos gestores de la zona) y a las autoridades municipales de los municipios involucrados que, en la adaptación de planes estratégicos de cada municipio, el manejo de las cuencas hidrográficas que se involucran, sean aprovechadas y gestionadas adecuadamente a fin de disminuir el riesgo ambiental del agua y evitar crisis hídricas a corto plazo.



## CONCLUSIONES

1. Al evaluar el riesgo ambiental del agua en la subcuenca del Río Gallinas a través del modelo de distribución espacio-temporal, se obtuvo lo siguiente:  
Hubo un aumento del riesgo desde 1990 al 2020, especialmente en la zona urbana de Tamasopo y los alrededores de la cascada de Tamuín, según se observó en los mapas que describen el riesgo ambiental del agua.  
Gran parte de la cuenca por el momento no se ha sobrepoblado, ni sobreexplotado.  
El riesgo ambiental estuvo determinado principalmente por las variaciones de los peligros, la exposición y de la vulnerabilidad, los cuales se ven afectados principalmente por la descarga de aguas residuales, el incremento de la población y el consumo del sector agrícola.
2. Se determinaron las variables de los componentes del riesgo ambiental del agua para cada uno de los factores de riesgo establecidos en la matriz de evaluación de riesgo por el método de Proceso Analítico Jerárquico: peligro, exposición, vulnerabilidad y gestión. Las principales variables son: descargas de aguas residuales, población y agua para la agricultura presentando los pesos más elevados 0.59, 0.62 y 0.54 respectivamente.
3. Se determinó el índice de riesgo ambiental del agua (WERI) utilizando la matriz de evaluación de riesgo, ArcMap®, raster calculator con el operador Power para cada uno de los factores de dicha matriz, y se obtuvieron los mapas para cada una de las variables que describen el riesgo ambiental del agua para los años 1990 a 2020. Las zonas con mayor riesgo se concentran en Tamasopo por ser el municipio más poblado de la cuenca y en la cascada de Tamuín.
4. Se desarrolló una distribución espacial del riesgo ambiental a través de representaciones de series de tiempo de 1990 a 2020 de los factores que mayor inciden en la cuenca del Río Gallinas y se determinó que el incremento del consumo de agua se debe al crecimiento de la población, y al consumo de agua para la agricultura, especialmente caña de azúcar. En

las proyecciones se presenta una tendencia a seguir aumentando hasta el 2035, la cual debe tomarse en cuenta para la elaboración de estrategias a seguir a corto plazo.

5. El modelo de distribución espacio-temporal permitió evaluar los factores de riesgo ambiental del agua en la cuenca del Río Gallinas aportando información sobre los peligros en las zonas de Tamasopo y Tamuín, donde los actores involucrados deben incidir para disminuir los riesgos y equilibrar las actividades económicas con los recursos naturales.

## REFERENCIAS

- Agencia de la ONU para los refugiados ACNUR. (Julio de 2019). *EACNUR*. Obtenido de Los 10 países más poblados del mundo: [https://eacnur.org/blog/los-10-paises-mas-poblados-del-mundo-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst/](https://eacnur.org/blog/los-10-paises-mas-poblados-del-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/)
- Agencia de la ONU para los refugiados ARCNUR. (Julio de 2019). *EACNUR*. Obtenido de Los 10 países más poblados del mundo: [https://eacnur.org/blog/los-10-paises-mas-poblados-del-mundo-tc\\_alt45664n\\_o\\_pstn\\_o\\_pst/](https://eacnur.org/blog/los-10-paises-mas-poblados-del-mundo-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/)
- Aguilar, N., Galindo, G., Contreras, C., & Fortanelli, J. (2010). Zonificación productiva cañera en Huasteca Potosina, México. *Agronomía Tropical*.
- Algara, M., Contreras, C., Galindo, G., & Mejía, J. (2009). Implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina. *Espacio tiempo*, 56-67.
- Algara, M., Contreras, C., Galindo, G., & Mejía, J. (2009). Implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la HUasteca Potosina. *Espaciotiempo*, 56-67.
- Ambrosio, G., Gonzalez, J., & Arevalo, V. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*. Málaga, España.
- Aragón, L., Treviño, E., Jiménez, J., González, M., Pompa, M., & Aguirre, C. (2013). Monitoreo de la deforestación mediante técnicas geomáticas. *Ciencia UANL*, 43-54.
- Arcudia, C., Azuara, H., Flores, S. B., & Espinosa, B. T. (2018). “*Agricultura industrial en la Huasteca Potosina: la caña de azúcar*”. Obtenido de Enlínea: <http://hdl.handle.net/20.500.11763/tlatemoani27cana-azucar>
- Ávila, P. (2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. *Ciencias*, 46-57.
- Balek, J. (1983). *Hydrology and Water Resources in Tropical Regions*. Amsterdam: Elsevier science.

- Bhandari, A., Kumar, A., & Singh, G. (2012). Feature Extraction using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): a Case Study of Jabalpur City. *Prodecia Technology*, 612 – 621 .
- Biswas, A. (1996). Agua para el mundo en desarrollo en el siglo XXI: Temas e implicaciones. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XI, Num 3, 5-11.
- Bonnafous, L., Lall, U., & Siegel, J. (2017). A water risk index for portfolio exposure to climatic extremes: conceptualization and an application to the mining industry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2075-2106.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2010). Analisis espacial con sistemas de informacion geografica. Aportes de la geografia para la elaboración del diagnostico en el ordenamiento territorial. *Posgrados UNAH*, 55-67.
- Campos, D. (2018). Análisis estadístico de la ocurrencia de sequías meteorológicas anuales según el tipo de clima del estado de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 213-231.
- Cano, M. (2014). *Gobernabilidad Nacional e Internacional de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Guatemala*. Guatemala.
- Cardona, O. D. (2003). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. "Una critica y una revisión necesaria para la gestión". *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*.
- Cecchini, S. (2005). *Indicadores sociales en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: ONU.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (25 de 05 de 2021). *Atlas nacional de riesgos*. Obtenido de Glosario:  
<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>
- Chávez, S. (2018). El concepto del riesgo. *Recursos Naturales y Sociedad*, 32-52.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (27 de junio de 2017). *La importancia que tienen los Bosques Tropicales*. Obtenido de Gobierno de México:  
<https://www.gob.mx/conanp/articulos/la-importancia-que-tienen-los-bosques-tropicales#:~:text=Los%20bosques%20tropicales%20tienen%20una,f%C3%A9rtil%20al%20producir%20materia%20org%C3%A1nica%20>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Numeragua*. México.

Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA). (2009). *Semblanza histórica del agua en México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SERMANAT.

Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA). (2010). Usos del agua. *El agua en México*.

Comisión Nacional Forestal. (28 de Junio de 2018). *Trópicos, biodiversidad y sabor*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/tropicos-biodiversidad-y-sabor?idiom=es>

Comité de parajes naturales certificados en la cuenca del Río Tamasopo. (2016). *Programa playas limpias*. San Luis Potosí.

Comité de planeación para el desarrollo del Estado. (2015). *Programa sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. San Luis Potosí.

Comité del Consejo Nacional de Investigación (EE.UU.) para mejorar los enfoques de análisis de riesgos utilizados por EE.UU. (EPA). (2009). *Science and Decisions Advancing Risk Assessment*. Washington: National Academies Press (US).

Correa, E. (2000). *Series de tiempo*. Medellín: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia.

Cuevas, C. R., Almazán, R. C., & Benavides, A. C. (2019). *Informe final del estudio para la determinación de la calidad de agua, caudales y geoquímica del río Gallinas y sus aportes hídricos ubicado en la huasteca potosina*. San Luis Potosí.

- Cui, X., Wu, J., Li, Z., Peng, L., Shen, Z., & Bi, J. (2021). An Integrated Assessment and Factor Analysis of Water Related Environmental Risk to Cities in the Yangtze River Economic Belt. *Water*, 13(16), 2140. <https://doi.org/10.3390/w13162140>.
- Dávila, R., Algara, M., & Velázquez, J. (2020). Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca. *Ingeniería investigación y tecnología*.
- Delpino, M., Portillo, V., & Mora, C. (2018). Evaluación de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización de ambientes de humedales. *Embrapa Informática Agropecuaria*, 112-121.
- Di, H., Lui, X., zhang, J., Tong, Z., & Ji, M. (2018). Distribución espacial y variación del riesgo ambiental del agua en la cuenca del río Yinma, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1-14.
- Downing, T. (2005). *Integrating social vulnerability into water management*. Oxford: Stockholm Environment Institute.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Echavarría, F., Medina, G., Gutiérrez, R., & Serna, A. (2004). Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el ejido Pánuco, Zacatecas. *Técnica Pecuaria en México*, 39-55.
- Echemendía, B. (2011). Definiciones acerca del riesgo y sus implicaciones. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 170-481.
- Ellison, D., Morris, C., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., & Murdiyarsa, D. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 51-61.
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 409-427.

- Eskandari, A., Rosa, R. D., & Amini, S. (2015). Remote sensing of Damavand volcano (Iran) using Landsat imagery: Implications for the volcano dynamics. *Journal of volcanology and geothermal research*, 41-57.
- FAO. (2012). *Managing Africa's water resources: integrating sustainable use of land, forests and fisheries*. Accra.
- FAO-UNESCO. (1976). *Mapa mundial de suelos 1:5 000 000*. Paris: UNESCO.
- Flores, J., Mireles, R., Flores, J., González, B., & Chapa, L. (2008). *Programa Estratégico del Estado de San Luis Potosí 2006-2025*. San Luis Potosí.
- Food and Agriculture Organization of the United Nation, FAO. (1986). *Strategies, approaches and systems in integrated watershed management*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2013). *Forest and Water*. Roma.
- Garrido, M. A. (2003). *Sistemas de información geográfica y medio ambiente*. Cadiz: Cádiz Univerisidad, Servicio de publicaciones.
- Gestión ambiental forestal e hidráulica, S.C. (2014). *Proyecto "Cambio de uso de suelo de terrenos forestales para la ampliación y pavimentación del camino Palo Hueco-Los pocitos" ubicado en el ejido de San José del Corito y Durazno, municipio de Alaquines, estado de San Luis Potosi*. Alaquines.
- Giraldo, A. (2013). *Problemática y propuesta para el manejo sostenible del Río Tamasopo San Luis Potosí, México*. San Luis Potosí.
- Giraldo, A. (2013). *Problemática y propuesta para el manejo sostenible del río Tamasopo. (Tesis de maestría)*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Cologne University of applied sciences.
- Global Water Partnership, GWP. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Tegucigalpa.
- Gobierno de San Luis Potosí. (2009). *Tercer informe ciudadano*. San Luis Potosí.

- Hall, J., & Borgomeo, E. (2013). Risk-based principles for defining and managing water security. *Philosophical Transaction of the royal society*, 1-22.
- Heath, J. (2012). *Lo que indican los indicadores: Cómo utilizar la información estadística para entender la realidad económica de México*. Aguascalientes: INEGI.
- Hui Di, X. L., Zhang, J., Tong, Z., & Ji, M. (2018). The Spatial Distributions and Variations of Water Environmental Risk in Yinma River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- INEGI. (1985). *Síntesis del Estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí.
- INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2015). *Atlas de la vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Morelos.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (18 de Junio de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Qué son las sequías: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-son-las-sequias?idiom=es>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía ,INEGI. (2020). *Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo*.
- Instituto Nacional De Estadística Y Geografía, INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de PIB y Cuentas nacionales: <https://www.inegi.org.mx/temas/igae/>
- Israelsen, O., & Hansen, V. (1963). Irrigation Principles and Practices. En O. Israelsen, & V. Hansen, *Irrigation Principles and Practices* (pág. 448). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización*. Roma: Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO.
- Jabardo, V., & Padilla, L. (2016). La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): conflictos locales. *Revista Universitaria de Geografía*, 133-165.



- Jessica, B., & Dominick, S. (2019). Climate Benefits of Intact Amazon Forests and the Biophysical Consequences of Disturbance. *Frontiers in forest and global change*, 1-13.
- Kamarck, A. (1978). *Los tropicos y el desarrollo económico*. Madrid: Tecnos.
- Lárraga, R. (2014). *Componentes de sostenibilidad de la vivienda tradicional en el ámbito rural de la región huasteca de San Luis Potosí: hacia una arquitectura rural sustentable*. San Luis Potosí.
- Lawrence, P., Meigh, J., & Sullivan, C. (2002). *The Water Poverty Index: an International Comparison*. Staffordshire: Kerp Keele Economics Research Papers.
- Lewis, S. (2006). Tropical forests and the changing earth system. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 195-210.
- López, B., Santacruz, G., Ramos, J., & Morán, J. (2015). Índice de pobreza del agua en zonas subtropicales: el caso de la Huasteca Potosina, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 173-184.
- Martínez, P. (2013). Los retos de la seguridad Hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 5, 165-180.
- Martínez-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y ciencias del agua*, 165-180.
- Memon, A., Muhammad, S., Rahman, S., & Haq, M. (2015). Flood monitoring and damage assessment using water indices: A case study of Pakistan flood-2012. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 99-106.
- Méndez, A. (2013). “Series de tiempo: Una aplicación a registros hidrométricos en una cuenca del estado de Oaxaca.
- Microsoft . (2022). *Support Microsoft*. Obtenido de Genere una previsión en Excel para Windows: <https://support.microsoft.com/es-es/office/genere-una-previsi%C3%B3n-en-excel-para-windows-22c500da-6da7-45e5-bfdc->



- Organización Meteorologica Mundial . (2012). *Guía del usuario sobre índice normalizado de precipitación* . Ginebra.
- Organización Mundial de la Salud OMS. (2003). *Domestic Water Quantity, Service, Level and Health* . Geneva: WHO Press.
- Organización Mundial de la Salud OMS. (Julio de 2017). *WHO*. Obtenido de Agua, saneamiento e higiene: <https://www.who.int/es/news-room/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation>
- Organización Naciones Unidas ONU. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*. Paris: UNESCO.
- Osorio, J., & Orejuela, J. (2008). Analitic hierarchic process and multicriteria decisión making. Application example. *Scientia et Technica*, 247-252.
- Palma-López, D., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zúñiga, F., Morales-Garduza, M., López-Castañeda, A., Shirma-Torres, E., . . . Tinal-Ortiz, S. (2017). Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México. *Agro Productividad*, 3-8.
- Pizarro, R. (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2006). *Informe sobre Desarrollo Humano 2006*. Nueva York: Grupo Mundi-Prensa.
- Rios, D. (2018). Monitoreo del efecto del cambio climático en la Huasteca Potosina a partir de técnicas de percepción remota y estaciones climatológicas.
- Rodríguez, C., Cisneros, R., & Cardona, A. (2019). *Estudio para la determinación de la calidad de agua, caudales y geoquímica del Río Gallinas y sus aportes hídricos ubicados en la Huasteca Potosina*. San Luis Potosí.
- Rodriguez, C., Hernández, A., Cauder, C., Hernández, J., & Padilla, D. (2022). Hydrodynamical Assessment of the Recent Droughts at Gallinas River in San Luis Potosí México and Its Impact on the Waterfall Tamul. *Water*.

- Ruiz, N. (2012). La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. *Investigaciones geográficas*, 63-74.
- Sánchez, D., & Egea, C. (2011). Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales. Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de población*, 151-185.
- Sánchez, J. (2022). *Hidrología superficial y subterránea*. 2 da edición Kindle Direct Publishing.
- Sánchez, M. I. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. *Cuadernos técnicos sociedad española de geomorfología*, 1-40.
- Schumann, T. (Diciembre de 2018). *Water Risk: Single Largest Risk Threatening People, Planet and Profit*. Obtenido de Green money: [greenmoney.com/water-risk-single-largest-risk-threatening-people-planet-and-profit/](https://greenmoney.com/water-risk-single-largest-risk-threatening-people-planet-and-profit/)
- Secretaría de desarrollo social y regional San Luis Potosí. (2018). *Programa sociales 2018: Alcantarillado y drenaje*. San Luis Potosí.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2008). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (14 de julio de 2021). *Gobierno de México*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-ambiental-y-de-recursos-naturales>
- Society, A. M. (1997). Meteorological Drought – Policy Statement. *Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 78, No. 4*, (págs. 847–849).
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, 9-18.
- United Nations. (2018). *UN-Water*. Obtenido de Sustainable Development Goals: [https://www.unwater.org/publication\\_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/](https://www.unwater.org/publication_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/)

- Valadéz, A., & Landa, P. (2003). Política y Gestión Ambiental. Características y Lineamientos generales. *Psicología y Ciencia Social*, 100(2), 54-61.
- Van der Molen, F. (2018). How knowledge enables governance: The coproduction of environmental governance capacity. *Environmental Science & Policy*, 18-25.
- Vargas, S. L., Güemes, A. M., Güemes, M. D., & Almegua, V. (2018). Propuesta metodológica para evaluar la actividad turística con criterios locales de sustentabilidad en la Huasteca potosina. *Sustainable Development Research and Practice in Mexico and Selected Latin American Countries*, 217-240.
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Water Center for the Humid Tropics of Latin America and the Caribbean. (1999). *Hydrology and water management in the humid tropics*. Ciudad de Panama: UNESCO.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land. 1-98.
- Watkins, K. (2006). *Informe sobre desarrollo humano: Escasez de agua, riesgo y vulnerabilidad*. Nueva York: PNUD.
- World Wide Fund, (WWF). (2009). *Understanding water risks*. Godalming.
- WWF. (2010). *Qué son los riesgos hídricos?* Gland: World Wildlife Fund.
- Zeļeņáková, M., Kubiak-Wojcicka, K., Weiss, R., Weiss, E., & Abd, E. H. (2021). Environmental risk assessment focused on water quality in the Laborec River watershed,. *Ecohydrology & Hydrobiology Volume 21, Issue 4,* 641-654.