



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

**INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL LAGO DE
CHAPALA, JALISCO**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

PRESENTA:

MIRIAM GUADALUPE CASTRO LAZCARRO

ASESOR:

DR. ABRAHAM CÁRDENAS TRISTÁN

CO-ASESOR:

DRA. VALENTINA DAVYDOVA BELITSKAYA

San Luis Potosí, S.L.P, octubre 2019





Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Que para obtener el grado de:

Maestra en tecnología y Gestión del Agua

Influencia de la variabilidad climática en el lago de Chapala, Jalisco

TESIS

Presenta:

Lic. Miriam Guadalupe Castro Lazcarro

Sinodales:

Presidente: Dr. Abraham Cárdenas Tristán

Secretario: Dr. Cristóbal Aldama Aguilera

Vocal: Dra. Valentina Davydova Belitskaya

Vocal: Dr. Marcos Algara Siller

Suplente: Dra. Marisol Gallegos García

Juan
[Firma]
Martineul
[Firma]
[Firma]





20 de junio de 2019

**LIC. EN BIOLOGÍA MIRIAM GUADALUPE CASTRO LAZCARRO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Abraham Cárdenas Tristán y Valentina Davydova Belitskaya** Asesor y Co-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 20 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Influencia de la variabilidad climática en el lago de Chapala, Jalisco"

Introducción.

1. Definición y características de la cuenca.
2. Análisis de la variabilidad climática y determinación de los factores externos que impactan en la degradación del Lago de Chapala a través de los años.
3. Análisis multi-temporal para la determinación de un patrón meteorológico del Lago de Chapala a través del tratamiento de imágenes Landsat.
4. Relación geoespacial entre la degradación de la superficie del Lago de Chapala y la presencia de la variación climática en la subcuenca Lerma Chapala.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"2019, aniversario 160 de la fundación del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí"

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres y a mi prometido Alberto porque ellos siempre serán mi más grande apoyo y motivación para cumplir mis metas y objetivos, y que además son las personas que me muestran siempre el camino hacia la superación.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a CONACYT por el apoyo y el financiamiento del proyecto, a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por su compromiso por la enseñanza y haber abierto sus puertas para mi desarrollo profesional, a mi director de tesis el Dr. Abraham por permitirme trabajar bajo su guía, así como, le agradezco a mi codirectora a la Dra. Davydova por su orientación, apoyo y enseñanza en el tiempo de movilidad, el cual fue un honor trabajar con ella. Finalmente, les agradezco a mis sinodales, al Dr. Cristóbal y Dr. Marcos por sus enseñanzas en clase y motivarme a mejorar y desarrollar habilidades en la investigación.

Quiero agradecer a Dios por permitirme cumplir otra meta más, a mi prometido Alberto, mi familia y a mis amigos que siempre me apoyaron desde Guadalajara y las personas que conocí en San Luis que en los momentos de mayor vulnerabilidad me dieron una palabra de aliento y motivación sin importar donde estuviera, a los ingenieros Andrés y Daniela por apoyarme en la realización del proyecto. Quiero mencionar de manera especial a Laura y toda su familia por haberme abierto las puertas de su hogar y apoyarme para poder concluir esta etapa importante.

“Para empezar un proyecto,
hace falta valentía.

Para terminar un gran proyecto,
hace falta perseverancia”

“La educación es el arma más poderosa que
puedes usar para cambiar al mundo”

Nelson Mandela

Contenido

Introducción	13
Antecedentes	15
Descripción del problema	24
Justificación	25
Marco teórico	27
<i>Teorías de variabilidad climática</i>	<i>27</i>
<i>Otras tendencias sobre la variabilidad climática</i>	<i>28</i>
<i>Análisis geoespaciales con percepción remota y sistemas de información geográfica</i>	<i>29</i>
Hipótesis	32
Objetivos	32
<i>General</i>	<i>32</i>
<i>Específicos</i>	<i>32</i>
Metodología	33
<i>Análisis de variables climatológicas</i>	<i>33</i>
<i>Análisis de imágenes satelitales</i>	<i>36</i>
Capítulo 1. Definición y características de la cuenca	37
Área de estudio	37
<i>Definición y características de la subcuenca en la zona de estudio</i>	<i>38</i>
<i>Estudios precedentes sobre la zona de estudio y caracterización geomorfológica de la cuenca</i>	<i>49</i>
<i>Uso de tecnologías geoespaciales para delimitar y representar a la cuenca Lerma Chapala</i>	<i>57</i>
<i>Representación de la cuenca, sus drenajes principales y escurrimientos</i>	<i>59</i>

Conclusión	72
Capítulo 2. Análisis de la variabilidad climática y determinación de los factores externos que impactan en la degradación del Lago de Chapala a través de los años ..	74
Determinación de variables relacionadas a la variabilidad climática	74
Determinación de variables de la hidrología del lago y otros elementos externos	74
Tecnologías para medir y evaluar el fenómeno de la variabilidad climática.....	77
<i>Parámetros de las plataformas (R-ClimDex y RHTest)</i>	77
<i>Procedimientos a considera de (R-ClimDex y RHtest)</i>	78
Conclusión	95
Capítulo 3. Análisis multi-temporal para la determinación de un patrón meteoroclimático del Lago de Chapala a través del tratamiento de imágenes Landsat.....	98
Determinación de parámetros	98
Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)	100
Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI).....	101
<i>Análisis del NDVI de los diferentes periodos de estudio (lluvia-estiaje)</i>	101
<i>Proceso de clasificación supervisada al conjunto de datos vectoriales y matriciales de la cartografía del uso de suelo</i>	102
<i>Análisis de la clasificación de uso de suelo de la zona en los diferentes periodos de estudio y sus alteraciones presentadas</i>	103
Discusión sobre los resultados obtenidos	106
Capítulo 4. Relación geoespacial entre la degradación de la superficie del Lago de Chapala y la presencia de la variación climática en la cuenca Lerma Chapala.....	108
Principales usos y aprovechamientos históricos del agua del Lago de Chapala.....	109
Dinámica actual de los aprovechamientos del uso del recurso del cuerpo de agua.....	110
Correlación de los resultados del análisis en R-ClimDex y RHTest de la variabilidad climática con los resultados de las variables del tratamiento de imágenes para determinar el patrón meteoroclimático del entorno del Lago de Chapala.....	111

Discusión de resultados obtenidos	115
Conclusiones.....	118
Recomendaciones	120
Referencias	121

Índice de figuras

Figura 1. Variación de temperatura a nivel mundial. Fuente: IPCC (2007).....	17
Figura 2. Flujo y simulación del fósforo, así como datos observados en el río Tame en Birmingham, Reino Unido. Fuente: Whitehead, et al., (2009).....	18
Figura 3. La cantidad de estaciones y su tendencia de incremento/decremento en la severidad de eventos M5D, de la parte alta de la cuenca (derecha) y baja de la cuenca (derecha). Fuente: Eriyagama Nishadi, et al. (2017).	20
Figura 4. Modelo CMAP en época de lluvia y sequía en Centro América y México. Fuente: Ambarish, et. al, 2011.....	21
Figura 5. Vulnerabilidad de las cuencas hídricas, analizadas a través de diferentes escenarios GFDLR30 (A), CCCM (B) y MTC (C y D). Fuente: INECC (2007).	23
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio, subcuenca Chapala.	39
Figura 7. Precipitación media anual en las diferentes zonas de la subcuenca Lerma Chapala.	41
Figura 8. Mapa comparativo de temperatura máxima en la subcuenca Lerma Chapala.....	43
Figura 9. Mapa comparativo de temperatura mínima en la cuenca Lerma Chapala.	45
Figura 10. Vegetación y uso de suelo en 1998 de la cuenca Lerma Chapala.....	47
Figura 11. Vegetación y uso de suelo de 2016 en la cuenca Lerma Chapala.....	48
Figura 12. Histograma de frecuencia de los grados de antropización de la cobertura vegetal.	49
Figura 13. Presencia de obras hidráulicas dentro de la cuenca Lerma Chapala.....	52
Figura 14. Elevación del río Lerma, cauce principal del lago de Chapala. Obtenido de SIATL (2019).	60
Figura 15. Comportamiento de la temperatura y precipitación en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).....	60
Figura 16. Lluvia probabilística con un período de retorno de 20 años en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).	61
Figura 17. Tipo de vegetación en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).	62
Figura 18. Red de drenaje y cuerpos de agua en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).	63

Figura 19. Localidades a 500 metros alrededor del lago de Chapala. Obtenido de SIATL (2019).	64
Figura 20. Altitud en la subcuenca Chapala. Datos obtenidos de INEGI.	65
Figura 21. Red de drenaje en la subcuenca Chapala	67
Figura 22. Corrientes de flujo dentro de la subcuenca Chapala.	69
Figura 23. Acumulación de flujo en la subcuenca Chapala.	70
Figura 24. Cuencas experimentales dentro de la subcuenca Chapala (2019.....	71
Figura 25. Promedio de almacenamiento anual del lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).	75
Figura 26. Entrada de agua por medio de río en el lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).	75
Figura 27. Salidas de agua en el lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).	76
Figura 28. Presas con influencia en los niveles del lago de Chapala. Obtenido de Arreguin-Cortés (2013).	77
Figura 29. Anomalías de la precipitación en el periodo 1961 - 1990 en la cuenca Lerma Chapala.	79
Figura 30. Anomalía de la precipitación en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.	80
Figura 31. Anomalía en precipitación en el periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.	81
Figura 32. Anomalía de la precipitación en el periodo de 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala	82
Figura 33. Anomalía de la temperatura mínima en el periodo 1961 a 1990 en la cuenca Lerma Chapala.	83
Figura 34. Anomalía de la temperatura mínima en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.	84
Figura 35. Anomalía de la temperatura mínima del periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.	85
Figura 36. Anomalía de la temperatura mínima en el periodo 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala.	86

Figura 37. Anomalías en temperatura máxima en el periodo 1961 - 1990 en la cuenca Lerma Chapala.	87
Figura 38. Anomalía de la temperatura máxima en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.....	88
Figura 39. Anomalía de la temperatura máxima en el periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.....	89
Figura 40. Anomalía de la temperatura máxima en el periodo 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala.....	90
Figura 41. Comportamiento de la temperatura máxima en los diferentes periodos representativos.....	91
Figura 42. Comportamiento de la temperatura mínima en los diferentes periodos representativos.....	91
Figura 43. Comportamiento de la precipitación en los diferentes periodos representativos.	92
Figura 44. Comportamiento de los índices de cambio climático en la cuenca Lerma Chapala.	94
Figura 45. Análisis de diferentes imágenes en temporada de estiaje Landsat del cambio de uso de suelo desde 1985 a 2018.....	103
Figura 46. Análisis de diferentes imágenes en temporada de lluvia Landsat del cambio de uso de suelo desde 1985 a 2018.....	104
Figura 47. Análisis de diferentes imágenes en temporada de estiaje con imágenes Landsat de la vegetación.	105
Figura 48. Análisis de diferentes imágenes en temporada húmeda con imágenes Landsat de la vegetación.	106
Figura 49. Gráfico comparativo del Índice Normalizado de Agua (NDWI), a través de imágenes Landsat.	111
Figura 50. Gráfico comparativo del Índice Normalizado de Agua (NDWI), a través de imágenes Landsat.	112
Figura 51. Actividades que ayudaron al cumplimiento del objetivo general.....	114

Índice de tablas

Tabla 1. Proyección promedio mundial del incremento de temperatura y aumento del nivel del mar. Fuente: IPCC (2007).....	15
Tabla 2. Índices analizados por medio de RCLimDex y sus significados.....	93
Tabla 3. Selección de imágenes en el período de estiaje. Obtenido de USGS (2019).	99
Tabla 4. Selección de imágenes en el período lluvioso. Obtenido de USGS (2019).	100
Tabla 5. Clasificación según la disponibilidad de agua, utilizado por CONAGUA.	110

Introducción

La presente investigación se refiere al tema de la variabilidad climática y su influencia en el lago de Chapala, Jalisco; que se puede definir como aquellas alteraciones en el sistema climático que afectan al comportamiento de las variables climáticas como la temperatura máxima, mínima y la precipitación, y que, a su vez impacta de forma directa al área del lago de Chapala. La peculiaridad de este tipo de afectaciones es la reducción en el almacenamiento de agua en el lago, que ha sufrido en algunos periodos, así como, el incremento de la temperatura media y la reducción de la lluvia.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar el Informe del Grupo Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en 2007, en el cual se evalúa que de 1961 a 1990 incrementó la temperatura mundial hasta 0.6°C , cabe señalar que el comportamiento tiene relación con el aumento de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, que se acrecentó hasta 70% desde el año 1970 al 2004. Dicho de otra forma, la mayor parte del comportamiento ascendente de la temperatura es muy probablemente consecuencia de los GEI antropógenos. Cabe mencionar, que en una investigación realizada por Karmalkar *et al.*, (2011) donde se hacen proyecciones climáticas para Centro América y México, se muestra un incremento en la temperatura media durante todo el año y una disminución en las precipitaciones del país, es decir, se visualiza una desaparición del sistema bimodal, con estaciones poco diferenciadas.

La investigación del tema se realizó por el interés de conocer las condiciones que influyen en la reducción de la superficie del lago de Chapala, y a su vez, el efecto que ejerce la variabilidad climática en el cuerpo de agua. En el marco de la metodología utilizada en la evaluación de la variabilidad climática, se realizó por medio de la recopilación de bases de datos de las estaciones climatológicas de CONAGUA, dentro de la cuenca Lerma Chapala, donde por medio de una serie de filtros se optó por quedarse solo con aquellas que ofrecieran una mejor calidad de la información, posteriormente, se aplicó el procedimiento estadístico de la media móvil por periodo representativo a cada una de las variables, así como, el análisis de los índices extremos del cambio climático en RCLimDex. En seguida, se evaluó el cambio o modificaciones del uso de suelo, por medio de imágenes satelitales Landsat, dichas

imágenes fueron seleccionadas desde 1985 hasta 2018, durante la temporada de estiaje y de lluvia, y donde se clasificaron a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual sirvió para el análisis y comparación de las superficies utilizadas para cada parámetro de uso de suelo. Finalmente, fue calculada el área correspondiente a cuerpos de agua dentro de la cuenca, así como, de la superficie del lago de Chapala a través de los años, el análisis y comparación de la superficie se realizó por medio del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), de forma histórica y por temporadas representativas.

En el capítulo 1 se realiza el planteamiento acerca de, ¿en qué contexto o qué características tiene la cuenca? ¿qué estudios se han realizado en la región relevantes a la degradación del cuerpo de agua? ¿qué nuevas tecnologías son de ayuda en el diagnóstico de la cuenca?

En el capítulo 2 se determinan las variables a analizar en la variabilidad climática, así como, en la hidrología del lago de Chapala, posteriormente, se examina la variación climática y los factores externos que podrían estar influyendo en la reducción de la superficie del espectro de agua.

En el capítulo 3 se realiza un estudio multi - temporal a través de imágenes Landsat, donde se contestan a interrogantes como ¿qué tipo de cambios ha habido en el uso del suelo desde 1985 hasta el 2018? ¿qué tecnologías ayudan a la clasificación de la región?

En el capítulo 4 se puede visualizar una relación geoespacial entre la degradación del lago de Chapala y la variabilidad climática, sin dejar de lado las alteraciones antropogénicas como el cambio de uso del suelo y los usos y aprovechamientos históricos del agua en la región de estudio.

Antecedentes

Alrededor del mundo se han presentado diversos escenarios ligados a la variabilidad climática, y a consecuencia de estos fenómenos se ha presentado mayor interés en el estudio de la climatología mundial, la cual se ha ligado estrechamente con la variación de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera. Así mismo, las modificaciones de la cubierta vegetal y de radiación solar, han originado el desequilibrio energético del sistema climático. Las emisiones de GEI por efecto de actividades humanas ha incrementado en los últimos años, aproximadamente 70% de 1970 a 2004. El mayor incremento de GEI atmosférico desde mediados del siglo XX se ha atribuido principalmente a actividades humanas. El dióxido de carbono, el gas antropogénico más importante, ha incrementado alrededor de 80% entre 1970 a 2004, sin embargo, en los últimos 30 años ha existido una fuerza discernible a nivel internacional sobre los efectos observados en sistemas físicos y biológicos. Así mismo, de continuar el aumento de emisiones GEI sería directamente proporcional al incremento de temperaturas, provocando modificaciones en el régimen climatológico, probablemente mayores a los observados en el siglo XX (IPCC, 2007).

Tabla 1. Proyección promedio mundial del incremento de temperatura y aumento del nivel del mar.

Fuente: IPCC (2007).

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090 – 2099 respecto de 1980 – 1999)		Aumento de nivel del mar (m en 2090 - 2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo)
Concentraciones constantes en los niveles del año 2000	0.6	0.3 – 0.9	No disponible
Escenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
Escenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45

Escenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
Escenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
Escenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
Escenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

A través del tiempo se ha visto una marcada diferencia de los recursos hídricos disponibles en el planeta, como consecuencia de la disminución de la precipitación y el incremento de la tasa de evaporación. Los recursos hídricos aprovechables dependen directamente de la cantidad de agua precipitada y el agua que vuelve a la atmósfera, y por efecto de la ley de conservación de la masa, el agua existente en la naturaleza es constante en sus diferentes formas. Sin embargo, el intercambio de masa se ve influenciada por el clima y por consecuencia cualquier alteración existente transforma el ambiente, es decir, a los recursos hídricos disponibles. Las modificaciones en la precipitación determinan el agua que llega a los continentes, así como la temperatura influye en los valores de evaporación y evapotranspiración, alterando a su vez, la cantidad y calidad de las corrientes y cuerpos de agua. La disminución de la cantidad de agua utilizable traería consecuencias negativas respecto a la calidad del agua, así como, un incremento en el nivel del mar y un decremento en el nivel piezométrico de los acuíferos (Iglesias *et al.* s/f).

Anualmente, la cantidad de agua aprovechable para la población en una cuenca hidrológica se encuentra restringida por la temperatura, la precipitación, el uso y cubierta del suelo, así como, las características del suelo y subsuelo (Iglesias *et al.*, s/f). A nivel mundial se ha registrado efectos de la variabilidad climática, como el aumento del nivel de mar, que ha incrementado desde 1961 en un promedio de 1.8 mm/año, aproximadamente, como consecuencia de la dilatación térmica y deshielo de los glaciares, casquetes de hielo y manto de hielo polar. Entre los años 1900 y 2005 la cantidad de agua precipitada aumentó en lugares del este en el Norte de América y del Sur, Europa septentrional y Asia septentrional y central, contrario a lo sucedido en Sahel, Mediterráneo, sur de África y en lugares del sur de Asia, es decir, a nivel mundial la escasez de agua ha afectado a diferentes regiones del mundo, probablemente desde 1970 (figura 1) (IPCC, 2007).

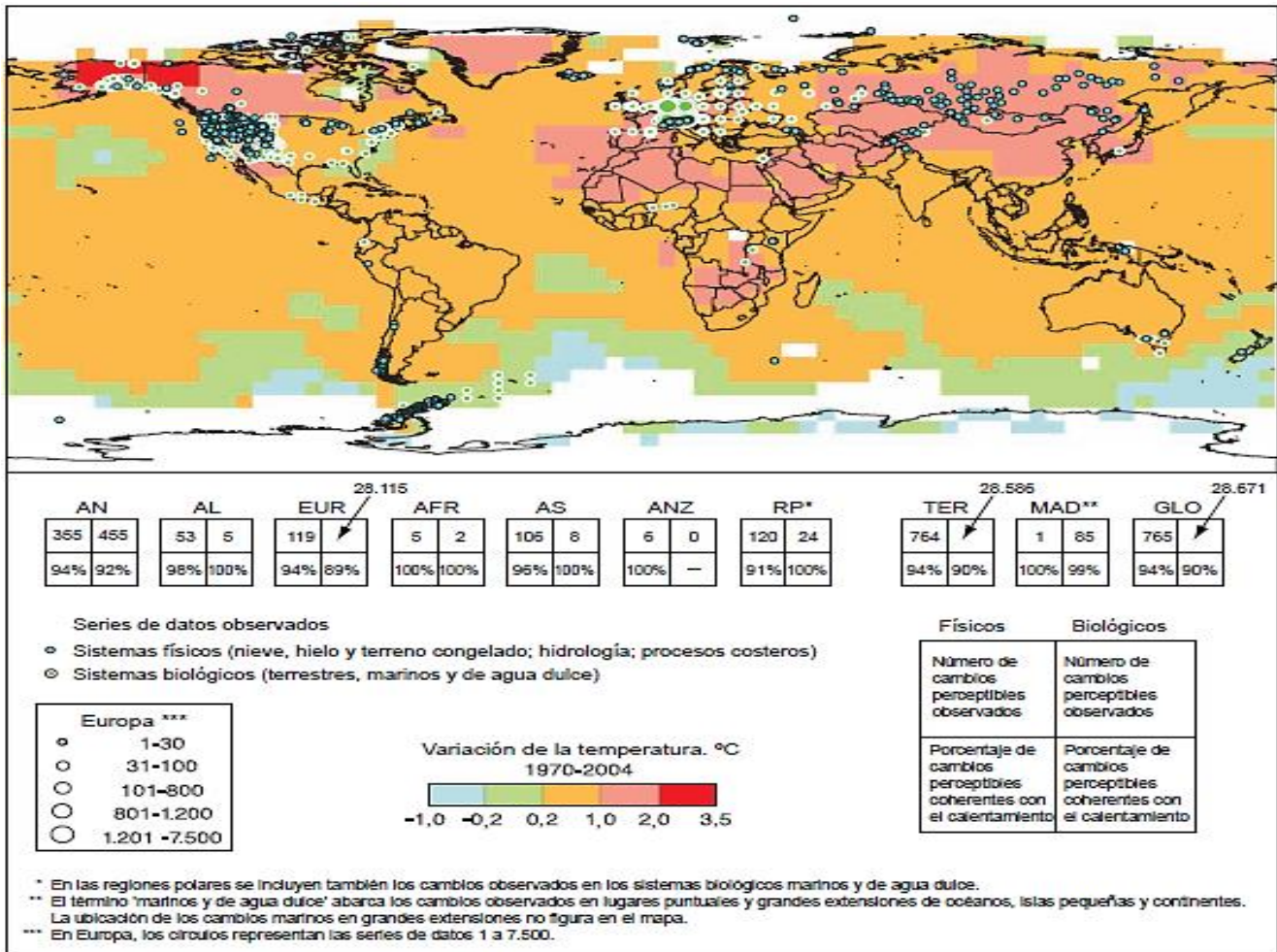


Figura 1. Variación de temperatura a nivel mundial. Fuente: IPCC (2007).

Sin embargo, los impactos potenciales en el agua no solo es la disponibilidad si no que es importante reconocer las consecuencias respecto a cambio en los contaminantes, es decir, las consecuencias que trae consigo un cambio de temperatura del aire y lluvia a los flujos de agua, y las alteraciones de las propiedades del agua, como, su capacidad disolvente y dispersión de contaminantes. En términos químicos el incremento de temperatura en el agua tiene un fuerte impacto en la cinética de las reacciones químicas, modificando la calidad del agua y a su vez, la disponibilidad para la población, para consumo o actividades humanas. Según predicciones en diversos estudios, se calcula que en 2080 habrá una disminución de hasta 35% en algunas regiones del globo terrestre, esto implica que habrá un menor flujo de agua y por lo tanto menor volumen de agua para diluir contaminantes, por lo tanto, altas concentraciones en la región baja del efluente desde el punto de descarga, ocasionando una

disminución de la calidad del agua, respecto a los límites máximos permisibles, originando la degradación de cuerpos de agua (Whitehead *et al.* 2017).

En una investigación realizada por Whitehead (2009), se demostró la relación entre la cantidad del agua y calidad de la misma, así mismo, se señala por medio del estudio en el río Tame, en Birmingham, Reino Unido la alteración en la química del agua, en donde se comparó la cantidad de fósforo y el comportamiento del flujo continuo del río, el estudio demostró que a mayor concentración contaminante se presentaba un menor flujo de agua, dicho aumento de concentración contaminante es consecuencia de la reducción disolutiva del agua; un efecto de menor disolución podría impactar a las concentraciones contaminantes orgánicas, debido a incremento de la demanda biológica de oxígeno (DBO), por lo tanto, menor concentración de oxígeno disuelto en cuerpos de agua. De la misma forma, en el río Tame se ha registrado la presencia de lirio acuático en algunos de sus veranos afectando la ecología del lugar, no obstante, se prevé que la intensidad y frecuencia de algas podría aumentar en los próximos años, afectando la cantidad de oxígeno disuelto (figura 2), es decir, empobreciendo la calidad del agua con bajos niveles de oxígeno, originando eventos de contaminación más severos durante el verano, consecuencia del flujo lento.

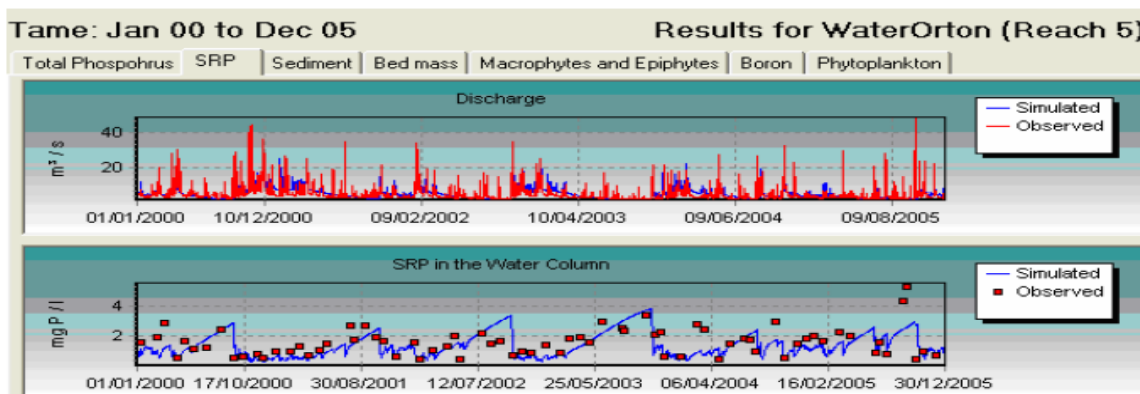


Figura 2. Flujo y simulación del fósforo, así como datos observados en el río Tame en Birmingham, Reino Unido. Fuente: Whitehead, *et al.*, (2009).

A través del tiempo han existido numerosos lagos que han desaparecido o degradado, como consecuencia del aumento de sedimento en su interior, no obstante, en la actualidad se pueden agregar otros elementos; como a los cambios en el régimen hidrológico y el mal

manejo del recurso hídrico. Ejemplo de ello es la degradación del lago Chad, localizado entre Chad, Niger, Nigeria y Camerún, el cual, ha sufrido un desecamiento a través del tiempo, ya que paso de tener una superficie de 26 000 km² a solo 900 km², y que según pronósticos se visualiza una desecación total en aproximadamente 20 años (“Lago Chad - EcuRed”, s/f). El cuerpo hídrico ha sido en numerosas ocasiones eje central de diferentes investigaciones, sin embargo, existe una investigación la cual relaciona el patrón de precipitación en la cuenca Kalu Ganga, en donde se relacionó por medio de dos índices de precipitación estacionales, la cantidad máxima en 1 día (M1D) y en 5 días (M5D), por lo cual se tomó como indicador a las lluvias extremas que han generado inundaciones o deslizamientos de tierra; así mismo, se evaluó la severidad del fenómeno y se calculó la tendencia de eventos extremos, así como, se evaluó la percepción social por medio de encuestas realizadas a 400 hogares dentro de la cuenca hídrica. Se obtuvo como resultado que entre 1974 – 2011, se presentó que 66% de los deslizamientos de tierra fueron en la parte alta de la cuenca y 57% en la parte baja fueron coincidentes con los eventos M5D, sin embargo, el índice M1D obtuvo 51% coincidente con registros de deslaves en ambas regiones de la cuenca. Por lo tanto, se llegó a la conclusión que el índice M5D se ajusta mejor para representar lo eventos extremos. Respecto a la tendencia de deslizamientos de tierra se obtuvo que en el periodo de mayo a septiembre se ha tenido una frecuencia de 41% en la parte alta de la cuenca, no obstante, según la misma tendencia ha variado la precipitación, disminuyendo la severidad de las lluvias. Finalmente, los resultados de la percepción social y el cambio en el clima indican que el 28% cuenca arriba, así como, el 26% de la zona baja cree que se han tenido algunos puntos de alta intensidad, de manera que el resto de la población se encontraba indecisa de su respuesta. El sesenta y cuatro por ciento de la población encuestada fueron granjeros y creen que son más vulnerables a los efectos de la variabilidad climática. Sin embargo, la mayoría de los encuestados reconocen que la presencia de pantanos en la zona juega un papel importante en la mitigación de deslizamientos de tierra (Eriyagama *et al.*, 2017).

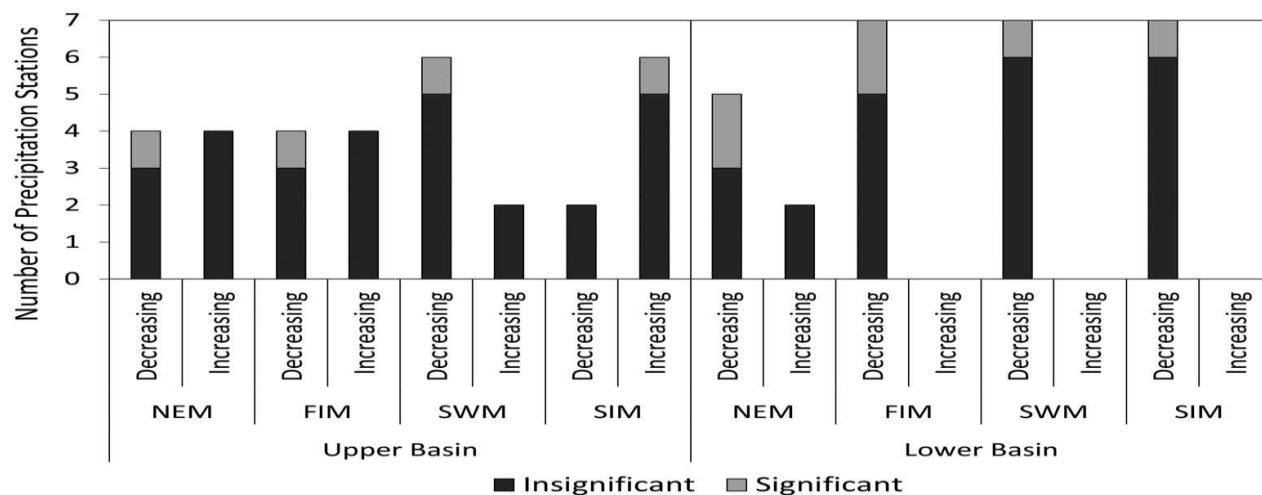


Figura 3. La cantidad de estaciones y su tendencia de incremento/decremento en la severidad de eventos MSD, de la parte alta de la cuenca (derecha) y baja de la cuenca (derecha). Fuente: Eriyagama Nishadi, et al. (2017).

Por otra parte, se tomó en cuenta la deforestación en la cuenca Kalu Ganga, la cual fue medida por medio del análisis de imágenes satelitales, en el periodo de 1988 – 2008, donde se encontró que ha existido un cambio de uso de suelo en la cuenca, por lo cual los más afectados del crecimiento poblacional han sido los campos de cultivo de arroz. Anteriormente, las zonas de cultivo servían para la retención hídrica y evitaban las inundaciones, es decir, el incremento de los asentamientos humanos ha alterado el terreno y las funciones naturales, dicho de otra manera, la modificación de escorrentías y las infiltraciones naturales del agua han aumentado la vulnerabilidad a eventos extremos, por lo cual, la investigación demuestra que los desastres naturales no pueden ser completamente atribuibles a la variación climática global, sino que existe un factor importante a considerar a nivel local o regional, es decir, la deforestación o el cambio de uso de suelo (Eriyagama et al., 2017).

No obstante, a nivel de continente se ha visto modificado el clima, según Karmalkar et al., (2011) la climatología de México y Centro América tiene que ver directamente con el tipo de relieve topográfico, que a su vez implica tener gran diversidad de climas, donde interactúan variables como temperatura, precipitación, humedad y viento. Las interacciones entre las diferentes variables tienen como principal eje la cercanía del océano, de manera que la alta variabilidad de climas se compone de manera horizontal y vertical; como

consecuencia, se presenta una alta biodiversidad biológica en la región, mucha de esta variedad de elementos es dado por su relieve, que es particularmente susceptible a la variación climática. Aunado, a la deforestación que se ha experimentado con mayor intensidad desde la década de los 60 (Myers *et al.*, 2000). Según el estudio realizado en Centro América y México en 2011, acerca de los efectos climáticos en la región, donde se analizaron variables como la temperatura, precipitación, humedad, viento y presión barométrica de los últimos 30 años, el estudio se realizó por medio de 3 diferentes análisis estadísticos, Modelo de Circulación General (GCM), Modelo Muti-datos (MMD) y el Índice de Cambio Climático Regional (RCCI); los resultados mostraron ligeras diferencias dependiendo del método utilizado. Dicho de otra forma, el procedimiento con mayor nivel de confianza fue RCCI, que demuestra que existe una variación baja de temperatura durante los últimos 30 años, sin embargo, el método GCM muestra que en las partes más altas se presenta un aumento importante de temperatura a diferencia de las zonas bajas. En cuanto a los análisis realizados para precipitación tienen una distribución bimodal, temporada húmeda y de estiaje; en temporada de lluvia se observó una disminución significativa del recurso en Centro América y un exceso de precipitación en la Península de Yucatán. De acuerdo a la proyección RCM la temperatura presenta un comportamiento creciente, mayor que el incremento previsto a nivel mundial (de hasta 4°C), sin embargo, en la Península de Yucatán se prevé un aumento de hasta 4.7°C (figura 4), afectando directamente a la biodiversidad y ecología de poblaciones en México y Centro América, así como, a la producción de alimentos (Karmalkar *et al.*, 2011).

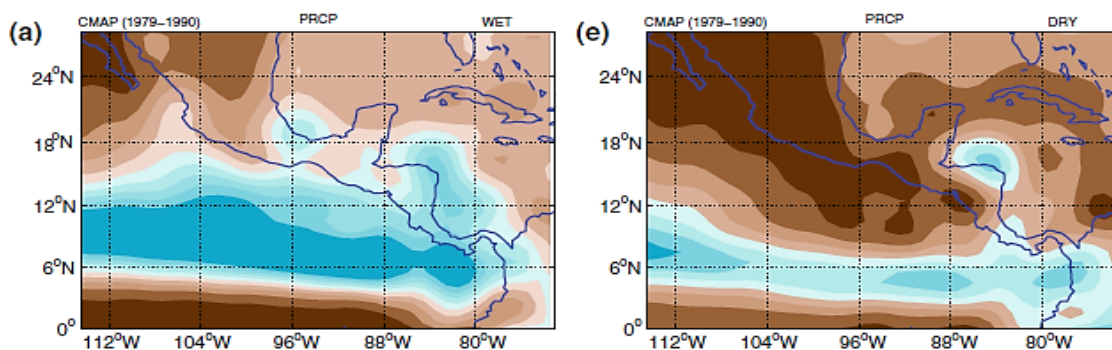


Figura 4. Modelo CMAP en época de lluvia y sequía en Centro América y México. Fuente: Ambarish, *et. al*, 2011.

En la actualidad, el país ha presentado diferentes alteraciones climáticas, consecuencia de la variabilidad climática, y el efecto del aumento de temperaturas a nivel mundial; tales como, alteraciones en eventos climatológicos, siendo el más evidente la modificación del ciclo hidrológico, y como consecuencia se presentan prolongadas inundaciones y/o sequías. En México se ha visto principalmente vulnerable la región del norte que ha alterado la composición de suelos, convirtiéndolos a estériles, aunado a la ausencia de precipitaciones, causando la disminución o desaparición de corrientes y cuerpos de agua, y la sobreexplotación de los mantos freáticos. Sin embargo, en la región sur del país la cantidad de precipitaciones intensas va en aumento, en donde se han presentado inundaciones y deslizamientos de tierra. Así mismo, se ha presentado una alteración de las estaciones, la cual prolonga las altas temperaturas. Según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se han modificado los patrones que daban origen al establecimiento de estaciones, donde se han manifestado periodos más calurosos, generando desfases meteoro-climáticos, que han provocado que las temporadas de calor empiecen de manera anticipada y finalicen tiempo después de la temporada que les corresponde, como consecuencia de estas variaciones han disminuido los bosques y selvas a nivel nacional; se tiene registro que desde 1990 a 2017 se ha generado una pérdida aproximada de 35% de los bosques y selvas del país, aunado al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero, lo cual, ha provocado un incremento de temperaturas, y que, a su vez ha generado un mayor desequilibrio meteorológico. Así mismo, el clima frío de las altas montañas se ha reducido y como consecuencia, ha desaparecido o disminuido la nieve de las partes altas del relieve. En el caso de nuestro país, las montañas más importantes con presencia de nevisca son el Pico de Orizaba, Popocatepetl e Iztaccíhuatl; dichos climas fríos de alta montaña se han modificado con el tiempo, de acuerdo a una investigación de Delgado (1996) desde el año 1960, la presencia de nieve en Iztaccíhuatl se ha reducido 70%, así mismo, ha desaparecido la nevisca del Popocatepetl desde el 2000. Aunado a estos efectos, se registró un aumento de enfermedades vectores como el dengue, zika y chikungunya, que se transmiten por medio de un mosquito, que generalmente afecta a las zonas tropicales, sin embargo, es en temporada de lluvias donde se presta más atención, además, según datos de la Universidad Autónoma de México, en los últimos 14 años se ha incrementado la población afectada, extendiéndose a 30 estados del país (López y Pontaza, 2017).

En el informe realizado por Olivares (2018), se evaluó la vulnerabilidad en las cuencas hidrológicas del país, donde, se estimó el volumen de agua que puede ser retirado de una región húmeda sin que se origine una zona seca por medio de tres diferentes escenarios (GFDLR30, CCCM y MTC), en el resultado del pronóstico GFDLR30 se muestra que la cuenca Lerma Chapala Santiago (VI) presenta una alta vulnerabilidad con riesgo a convertirse en zona árida, debido a la disminución de su reserva de agua, sin embargo, la mayor parte del país tendrá un clima con más lluvia. En los escenarios CCCM y MTC tienen un pronóstico diferente, se prevé que habrá un clima con menor precipitación en el país, donde la vulnerabilidad alcanza al sur del país (figura 5).

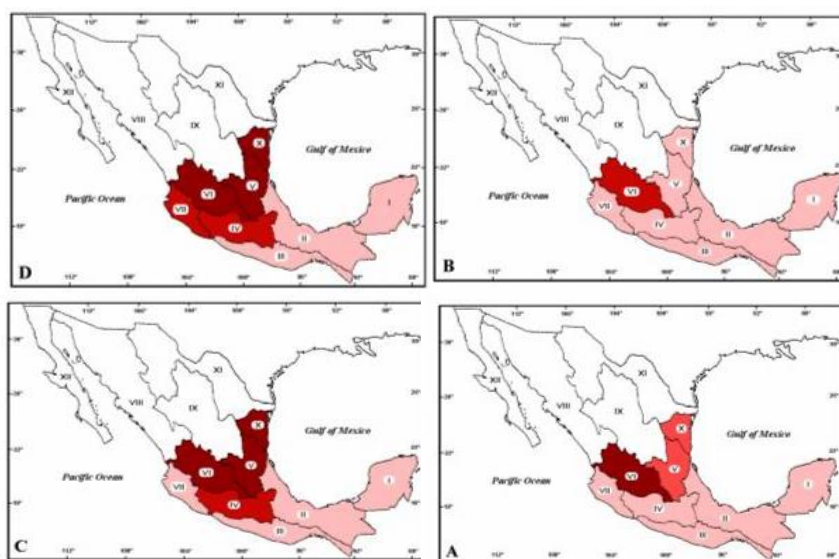


Figura 5. Vulnerabilidad de las cuencas hídricas, analizadas a través de diferentes escenarios GFDLR30 (A), CCCM (B) y MTC (C y D). Fuente: INECC (2007).

De igual forma, en un estudio realizado por Davydova y Romero, (2011) precisaron que el año 2010 fue un periodo diferente para México, debido a que se registró un aumento de 0.3°C de temperatura promedio anual, por otra parte, se consideró el año con mayor precipitación desde 1941, debido a la presencia de lluvias inusuales provocadas por el fenómeno denominado “El Niño”, el cual provoco un cambio en el patrón de precipitación en el país, así como, la transición al fenómeno “La Niña”, el cual se caracterizó por fuertes tormentas que afectaron a diferentes regiones del país entre los meses de julio a septiembre,

con excepción de octubre que sufrió una disminución de precipitaciones (6.7 mm). Al inicio del año 2010 se presentaron lluvias intensas, las cuales afectaron a diferentes estados provocando inundaciones y derrumbes, en la Ciudad de México y de sus áreas aledañas se registraron en los primeros 5 días de febrero un volumen de 57.2 mm, cuando el promedio de precipitación de área en esos días es de 8.2 mm, provocando severos daños en las comunidades más pobres. En otras palabras, después de una gran sequía en el año 2009, se dio paso al fenómeno del Niño en 2010, el cual incrementó la presencia de lluvias a nivel nacional.

Descripción del problema

Desde el inicio del desarrollo económico en el país se ha impulsado a la cuenca Lerma Chapala, y la cual se ha convertido en una de las regiones económicas y sociales más importantes del país, y que, a su vez se ha incrementado en los últimos cincuenta años la demanda hídrica, consecuencia del crecimiento de grandes ciudades como el Estado de México y la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), así como del desarrollo industrial de la región (Instituto Nacional de Ecología, 2006). El lago de Chapala (LG) significó 50% de los cuerpos lacustres del país, pero actualmente, tiene un riesgo de colapso ambiental por contaminación del agua y la pérdida de humedales como hábitat de vida silvestre y extracción del recurso para el abastecimiento de asentamientos humanos, industriales y agrícolas (Durán y Torres, 2003).

La región se define como deficitaria y altamente contaminada, con una constante presión sobre los recursos hídricos y los naturales. La disponibilidad de agua superficial está declarada como nula, aunado a que gran parte de los acuíferos localizados en la zona se encuentran sobreexplotados. Cabe señalar que los altos niveles de contaminantes de origen agrícola, industrial y urbano de la subcuenca afecta el aprovechamiento y utilidad del agua, simbolizando fuertes problemas a la salud pública, así como, la amenaza constante a diferentes especies de flora y fauna características de la zona. La fuerte actividad del sector agropecuario que define a la región y el crecimiento de las ciudades causan la pérdida de cobertura vegetal, provocando la degradación de los suelos, es decir, modificando los

ecosistemas de forma irreversible (IMTA, 2009). No obstante, se suma otro factor de gran relevancia en el estudio de la cuenca, la variabilidad climática que amenaza la sustentabilidad ambiental de la región, previendo la severa reducción de volumen del LC. En el país las zonas con mayor vulnerabilidad son el norte y centro, siendo la zona centro la de mayor población. En México la disponibilidad de agua per capita por año ha mostrado modificaciones, en 1995 era 11 500 m³, en el año 2000 fue 4 900 m³ y en 2005 disminuyó a 3 822 m³ (Rivas *et al.*, 2012).

Justificación

En México el lago de Chapala es el cuerpo de agua más grande a nivel nacional y el tercero de América Latina y el segundo respecto a su altitud con 1524 msnm. Además, funciona como regulador de temperatura de toda la cuenca Lerma – Santiago, con una superficie aproximada de 130 000 km², abarcando varios estados: México, Querétaro, Guanajuato Michoacán, Aguascalientes, Jalisco y Nayarit, es decir, la región centro occidental del país; siendo de gran importancia a nivel local, estatal y regional. En las comunidades localizadas alrededor del cuerpo de agua, se depende directamente de las actividades que se desarrollan en su entorno, aunado a esto, la relevancia para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), debido a que es la principal fuente de abastecimiento de agua, del cual, se extrae aproximadamente el 60% del recurso para cubrir las necesidades de la ZMG (“CEA Jalisco - Lago de Chapala”, s/f).

El lago de Chapala en el año 2008 se declaró sitio RAMSAR por su función de refugio, alimentación, hibernación y reproducción de aves silvestres, en el cual, las especies acuáticas migratorias son parte importante del ecosistema, debido a su importancia internacional; como consecuencia de la degradación de otros cuerpos de agua en el Occidente de México se ha incrementado el flujo de fauna migratoria, sus arribos son desde Alaska, Canadá y Estados Unidos. De igual manera, es refugio de fauna declarada amenazada o en peligro de extinción, según la NOM 059 SEMARNAT 2001, algunos de los animales ictícos¹ nativos registrados en la zona son: el charal (*Menidia contrerasi*), pescado blanco

¹ Definición que concierne a un pez, sin especificar la taxonomía.

campamacho (*Menidia sphyraena*) y el blanco trompudo (*Menidia promelas*). Sin embargo, aunque existen otras especies que no están dentro de la lista de amenazadas o en peligro de extinción, se presenta un fenómeno de degradación de zonas importantes para el reproducción, desove y alimentación de especies (Cano Sánchez, 2003).

El lago de Chapala es símbolo de centro de origen, evolución y biogeografía de la fauna íctica¹ de México, según un estudio publicado por Domínguez y Pérez (2007), la Mesa Central de México es de las más extensas a nivel mundial y es considerada por World Conservation Monitoring Center como una de las regiones más importantes para la conservación de peces de agua dulce, dicha característica es posible gracias la presencia de la principal zona de humedales dulceacuícolas del país con diversidad única de peces; en la zona se puede encontrar fauna endémica conformada principalmente por la familia Goodoidae (pintillas y tiros) la cual, posee el área de mayor diversidad con nueve especies presentes en la zona. La región es destacada por la evolución y especiación simpátrica² de los charales y pescados blancos que incluyen ocho especies. Aunado a la presencia de bagres endémicos, diversas carpas nativas, además del registro histórico de lampreas; a pesar de la contaminación la ictiofauna posee 39 especies, agrupadas en 9 familias, de las cuales 4 familias y 15 especies son de importancia comercial, sumado a 4 especies introducidas (Cano Sánchez, 2003).

Cuando se habla de la alteración de un cuerpo de agua se debe considerar integrar distintos elementos, como el cambio y uso de suelo, hidrología de la cuenca y variabilidad climática en la región. Es transcendental el análisis de distintos elementos para la interpretación y posterior relación de resultados. Al evaluar la variación de la superficie del lago de Chapala, se debe considerar diferentes aspectos importantes como el uso de suelo, la variabilidad climática y el uso o retención de agua cuenca arriba.

² Formación de una especie sin importar las barreras geográficas.

Marco teórico

Teorías de variabilidad climática

Mikhail Ivanovich Budyko, fue uno de los climatólogos considerados de los más importantes del siglo XXI, el cual recibió numerosos reconocimientos por su trabajo y fue calificado como padre de la climatología. Fue en 1971 cuando Budyko inició una investigación de variabilidad climática en la Tierra, dado que él entendía que la Tierra estaba en un período de calentamiento a nivel mundial. Acto seguido, se desarrolló la primera investigación en el Ártico, por medio de una expansión de observación actinométrica y métodos computacionales avanzados. Posteriormente, se realizó una investigación donde se medía los gases concentrados en la atmósfera en el pasado geológico, lo que concluyó que, el factor principal del cambio de temperatura es directamente proporcional a la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) contenido en la atmósfera. Dicho de otra forma, es por medio de la tendencia que los estudios asocian los fenómenos climáticos a los cambios y frecuencias de los eventos naturales. Es decir, la variabilidad climática ha existido desde hace millones de años debido a factores primarios como lo son; el sol, erupciones volcánicas o cambios en la órbita de la tierra (Budyko, 1977).

Es importante mencionar que el fenómeno se argumenta científicamente en dos direcciones, de tipo natural y/o antropogénico, este último inducido artificialmente a causa de actividades humanas. En la actualidad, son reconocidas 5 diferentes teorías de la variabilidad climática natural, en donde se intenta explicar la causa del fenómeno. 1) La teoría de Milankovitch, en donde se propone que el movimiento de la Tierra tiene influencia directa con el clima, considerando los efectos del movimiento orbital, oblicuidad y precisión. Seguido de los fenómenos que tienen como base el espacio; 2) los rayos cósmicos, en donde se supone afecta el clima terrestre, por lo que la teoría menciona que los rayos ionizan la atmósfera provocando un incremento de nubosidad y a su vez disminuyendo la temperatura; 3) Los gases de efecto invernadero y el ciclo del carbono, en donde esta teoría se relaciona con la realizada por Milankovitch, y dicha teoría es usada para relacionar el factor climático y el cambio en el ciclo del carbono, al ser el carbono un gas de efecto invernadero, el incremento del gas es directamente proporcional al aumento de temperatura, por lo tanto,

causa alteraciones climatológicas; 4) El efecto invernadero y el congelamiento de la Tierra, por lo que la teoría expone la importancia que juega la temperatura en cada una de las etapas de la Tierra, la cual a lo largo de su evolución ha tenido periodos de glaciaciones y calentamientos globales, así como propone como probable causa las placas tectónicas, y por último, 5) La deriva continental, en lo que dicha teoría sugiere que un factor importante es la ubicación continental, debido a que modifica la función de varios ciclos (Uscinski *et al.*, 2017). Las diferentes teorías muestran una relación de factores físicos, sin embargo, dan una idea del escenario actual, en donde se agrega el factor antropogénico, es decir, la variación de los gases de efecto invernadero y la radiación solar son los que causan las variaciones de la cubierta terrestre, que provocan un desequilibrio energético del sistema climático. Actualmente, se estima que las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) han aumentado, desde antes de la revolución industrial, aproximadamente 70% de 1970 a 2004 (IPCC, 2007).

Otras tendencias sobre la variabilidad climática

La variabilidad climática tiene su origen antropogénico en el siglo XIX, con la acumulación paulatina de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO₂), como consecuencia del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo), que han provocado mesas de discusión en la literatura científica en las últimas tres décadas. Actualmente, éste fenómeno se asocia con la creciente oleada de fenómenos meteorológicos severos (lluvias intensas, inundaciones, granizadas, olas de calor o frío, entre otras), también eventos climáticos como sequías, fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur y otros, que se han hecho más frecuentes e intensos, y por lo tanto de mayor riesgo para el medio ambiente y supervivencia de los ecosistemas del planeta, es decir, la variabilidad climática de origen antropogénico se considera de naturaleza artificial y el cual, ha sido descrito a partir de la revolución industrial con la quema de combustibles fósiles, es decir, se ha alterado la composición atmosférica, de modo que, ha originado fenómenos climáticos a nivel mundial (IPCC, 2007).

De acuerdo con las investigaciones de la Agencia de Protección Ambiental realizadas desde 1980, se prevé un aumento de la temperatura promedio para el 2100 de hasta 4°C a nivel global, lo que causaría alteraciones en el ciclo hidrológico, aumento de incendios forestales, incremento del nivel del mar, calentamiento de los océanos, descongelamiento de casquetes polares, cambio de periodos estacionarios, inseguridad alimentaria, desaparición de especies, entre otros. Se prevé que durante el siglo XXI exista un incremento en la intensidad de las precipitaciones, particularmente en zonas tropicales y regiones con mayores latitudes, así como, un incremento en la evaporación del agua. Así mismo, se prevén huracanes y tormentas tropicales más intensas (EPA, 2009). Según el Panel Intergubernamental del Calentamiento Global (IPCC) el calentamiento global antropogénico de las últimas tres décadas ha sido una posible influencia discernible a nivel mundial sobre los sistemas físicos y biológicos, donde según reportes de IPCC (2007) ha aumentado la temperatura promedio anual aproximadamente 0.74° C en el último siglo, el cual ha originado impactos en los recursos hídricos, y a su vez ha incrementado los eventos hidrometeorológicos extremos. Por lo tanto, los diferentes sistemas que conforman el planeta (físico, químico y biológico) han presentado alteraciones con un mayor efecto negativo, como consecuencia a la necesidad de entender el fenómeno se originó la bioclimatología, que, a su vez, se divide según sus impactos: humanidad, flora (agricultura y forestal) y en la fauna. Los investigadores bioclimatológicos frecuentemente hacen referencia al estrés ambiental, el cual provoca una respuesta biológica al fenómeno (Maarouf y Muun, 2002).

Análisis geoespaciales con percepción remota y sistemas de información geográfica

En las últimas dos décadas, el análisis y la medición de la superficie de la Tierra para diferentes fines ha incluido entre otras cosas importantes, una variedad de parámetros hidrometeorológicos, los cuales son necesarios y relativos para conformar las diversas técnicas de modelamiento geoespacial que se pueden efectuar; tales como el análisis de la vegetación, el abastecimiento hídrico de una cuenca, los modelos de la precipitación, el análisis de temperaturas, la radiación, entre otros factores climáticos importantes. De acuerdo al Proyecto del Satélite Internacional para la Climatología sobre la Superficie de la Tierra (ISLSCP, por sus siglas en inglés), se ha establecido las necesidades para determinar las

metodologías de desarrollo en la obtención de datos climatológicos cuantitativos de la superficie de la Tierra. Esto ha logrado generar desde las observaciones hechas en el satélite, en el que también se ha asociado el Proyecto de Análisis Retrospectivo (por sus siglas en inglés, IRAP), mismo que involucra evaluaciones de percepción remota histórica, así como, los datos climáticos que han sido registrados desde 1980. Tal proyecto responde a la demanda de información, y sus procesos de recolección de datos confiables y útiles en el monitoreo de variables climáticas, y de igual forma en la identificación de cambios antropogénicos en el planeta (Owe *et al.*, 1989).

En la actualidad, la generación de mapas climáticos de alta resolución, especialmente a escala local es una necesidad emergente en todo el planeta. No obstante, se cuentan con herramientas in situ, tales como el pluviómetro o los termómetros, entre otros; los cuales son de amplia distribución y uso intermitente sirviendo para verificar y validar el comportamiento de las abstracciones de espectros climáticos que se generan a partir de los procesos de la teledetección. Cabe señalar que los sistemas de percepción remota pueden generar datos consistentes, sin embargo, la red de radar y la radiometría en satélite solo pueden originar registros de datos térmicos pequeños, así como, mediciones indirectas, y por lo tanto requiere sistemáticamente de procedimientos de corrección (Marteau *et al.*, 2014).

Por otra parte, el procesamiento de la información de las diferentes variables en el ámbito de la meteoro-climatología; tales como: las ciencias del suelo, la topografía, el tipo de vegetación, la geomorfología del subsuelo, la hidrología, las variaciones de elementos o contaminantes en la atmósfera entre otras, tienen como función integrarse multidisciplinariamente para fundamentar una diversidad de estudios y procesos geoestadísticos, los mismos que se evidencian a través de la generación de mapas temáticos, ya sea a nivel nacional, regional o local, lo que ha guiado el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (por sus siglas en inglés, GIS), los cuales utilizan el sistema de manejo de bases de datos para la adquisición, el almacenamiento, el análisis y la proyección de información georeferenciada. Dicho de otra manera, se puede manipular la información desde diferentes fuentes, para integrar procesos complejos, alimentados por las bases de datos climatológicos y/o agro-meteorológicos existentes. Es decir, que la proyección de análisis

complejos puede ser representada a través de mapas digitales, mismos que pueden simular el comportamiento de sistemas complejos (Wilhite, 2005).

Es importante señalar que el éxito de los SIG depende de la calidad de la información, la precisión y la densidad de datos de la estación, así como de la actualización de la serie de tiempo que se generan para validar y correlacionar el comportamiento de la variación de los datos. Además, la estimación de valores en donde no existen registros de las estaciones se puede realizar por medio de diversos procesos de interpolación. Se considera que SIG cuenta con diversos métodos de interpolación, así como, otras técnicas estadísticas, y que, a su vez se combinan con potenciales intrínsecas, tales como, la conversión de datos, la edición, el análisis espacial, el modelamiento y las modificaciones o correcciones rápidas (Silva, 2002).

Hipótesis

El patrón de variabilidad climatológico ha sufrido modificaciones del efecto de variabilidad climática, el cual, ha impactado de forma negativa la superficie de la cuenca del lago de Chapala.

Objetivos

General

Relacionar las condiciones del lago de Chapala y efectos de las alteraciones climáticas a través del análisis de variabilidad climatológica y percepción remota.

Específicos

1. Determinar variables relacionadas a la variabilidad climática y variables de la hidrología del lago,
2. Identificar factores externos que impacten a la superficie del lago,
3. Analizar la degradación de lago de Chapala a través de los años,
4. Analizar un patrón climático de temperaturas y precipitación de la zona por períodos climáticos representativos (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2016),
5. Determinar la relación geoespacial entre degradación de la superficie del lago de Chapala y la presencia de la variabilidad climática en la cuenca Lerma Chapala.

Metodología

Análisis de variables climatológicas

Se inició con la descarga de información climatológica diaria de 60 estaciones situadas dentro de la subcuenca Lerma Chapala. Como fuente de información se utilizó la base de datos oficial única publicada del Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (www.smn.cna.gob.mx). Para selección de estaciones utilizadas para el cálculo de índices de cambio climático (ICC) se aplicó el control de calidad de datos inicial que incluye: 1. Operación vigente, 2. Densidad de datos, es decir el volumen de datos faltantes no debe ser mayor a 25%, 3. Persistencia de datos. Este análisis se realizó utilizando la herramienta computacional Excel 365. Posteriormente, con fines de análisis de lluvia total contra los escurrimientos que recibe Chapala, se realizó la división de la cuenca en 3 regiones: alta, media y baja, debido a que el caudal de escurrimientos o lo que recibe el lago de Chapala, este se encuentra en función de la lluvia total anual de la subcuenca parte alta (Meza y Enrique, 2010). Entre las particularidades del análisis de control de calidad preliminar se aplicó la siguiente metodología. Se estimó la densidad de datos en las estaciones por medio de una matriz de datos diarios para tres parámetros climáticos: temperatura máxima, mínima y precipitación. La selección de estaciones se basó en recomendaciones de IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático, por sus siglas en inglés), para el correcto análisis y evaluación de los datos se escogió aquellas estaciones con registros mayores a 75% por estación, así como, no tener más de tres años con ausencia de registros. Una vez seleccionadas se procedió a la corrección de las bases de datos, donde se rellenó los datos y fechas faltantes, y en los espacios sin valor se les agregó el valor (-99.99) con el fin de poder realizar el análisis en el Software RCLimdex 3.5.1. Principalmente, se les corrigió los demás errores en las temperaturas y finalmente, se cambió el formato del archivo a texto (.txt) para el posterior análisis con la herramienta computacional RCLimdex (Vázquez-Aguirre, 2010).

A continuación, se realizó una serie de tratamiento y filtración de estaciones con información sospechosa; y de manera que se inició con las que tenían una densidad de datos mayor a 75%, a continuación, se corrió el primer análisis estadístico por medio de RCLimdex

3.5.1, descargado de la página oficial de detección e índice de la variabilidad climática (<http://etccdi.pacificclimate.org>), herramienta con la cual se graficó el comportamiento de precipitación, temperatura máxima y mínima, por cada una de las estaciones. A partir de la información obtenida con RClimDex, se realizó el análisis de control de calidad de cada serie para excluir estaciones con información errónea o sospechosa. Con este fin se revisó la presencia de variabilidad u oscilación intraanual³, así como la revisión de valores sospechosos basándose en la información climática de las estaciones vecinas, no obstante, no se analizaron algunos de los índices debido a la cantidad de información disponible en las bases de datos.

Una vez realizados los índices de la variación climática se revisaron los resultados, los cuales, indicaron un error en la homogenización de las temperaturas por lo que se procedió a la descarga e instalación de del paquete RHtest, el cual, fue solicitado directamente al creador del código dentro del software R, el Dr. Yang Feng de la Universidad de Canadá. Posteriormente, se corrió el análisis de homogenización mensual, donde se originaron diferentes archivos en una carpeta “*output*” y donde se indicaban los datos sospechosos detectados por el software, en tales situaciones, se revisó y en algunos casos se corrigió de forma manual los meses señalados de las estaciones, dependiendo de si se trataban de frentes fríos, comportamientos por temporada de lluvias o si se tenía una estación de referencia para poder tomar la decisión de eliminar o dejar los valores sospechosos. En seguida teniendo los datos de las bases de datos ya homogenizadas se procedió a un nuevo análisis de índices de cambio climático, el cual, sirvió para corregir errores en los índices, y finalmente, se analizaron los datos diarios, a fin de, detectar valores sospechosos y procesar una vez más los índices, por consiguiente, las estaciones consideradas con mejor calidad de información fueron 18 estaciones en la cuenca Lerma Chapala.

Por medio de las estaciones que cumplen con los parámetros de calidad y cantidad necesarios dentro de la subcuenca Lerma Chapala, se realizó un análisis por período de 30 años cada uno (1961 – 1990, 1971 – 2000, 1981 – 2010) y a pesar de que el último período no alcanza aún los 30 años, se tomó en cuenta para tener un análisis más completo y lo más

³ Variación dentro del mismo año

actualizado posible (1991 – 2015). En seguida, se calculó el promedio y anomalía por período con las ecuaciones 1 y 2, mostradas a continuación:

(1)

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}$$

(2)

$$Anomalía = \frac{\bar{X}_{(1971-1990)} - \bar{X}_{(1961-1990)}}{\bar{X}_{(1961-1990)}} * 100$$

Una vez finalizado los análisis a las estaciones, se intentó crear mapas por medio de ArcMap, sin embargo, en el área de Guanajuato y Michoacán había un amplio espacio sin datos, por lo que se decidió utilizar las estaciones denominadas complementarias, que ya cumplían con los aspectos de calidad, y se agregó otras estaciones dentro y fuera de la subcuenca, para que el programa pudiera realizar las interpolaciones necesarias para un correcto análisis de la variable precipitación. Cabe mencionar que por medio de la búsqueda de diferentes bibliografías, se decidió realizar la interpolación con IDW (Inverse Distance Weighting), según Villatoro, *et al.* (2008), dado que es recomendable el uso de IDW cuando el tamaño de la muestra es pequeño, los datos del variograma no son conocidos, la distancia de muestreo es muy grande o cuando la distancia de muestreo es más grande al rango de correlación espacial.

Se hizo una recopilación de imágenes del lago de Chapala y Guanajuato desde el año 1985, debido a que se tiene una mejor resolución y calidad de las imágenes, las cuales se descargaron por medio de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), y los años seleccionados fueron tomados con intervalos de 5 años entre cada uno y por las temporadas representativas anuales, es decir, de lluvia y de estiaje.

Posteriormente, por medio del portal de Earth explorer se mandó pedir las imágenes ya con correcciones atmosféricas del área correspondiente a la cuenca Chapala, es decir, de los estados de Jalisco y Guanajuato, las cuales, se recibieron horas después de la solicitud, así mismo, de forma continua hubo una búsqueda de bibliografía relacionada. Una vez obtenidos los recursos se procedió a la unión de imágenes, sin embargo, algunas imágenes presentaban errores en el satélite, por lo que fue necesario la utilización de la herramienta “Landsat gapfill” de ENVI, posteriormente, se realizó una máscara para delimitar el área de estudio de la cuenca, en algunos casos no fue posible la correcta unión de imágenes en ENVI por lo que fue utilizado ArcMap, una vez unidas las bandas se inició con el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) a través de la creación de una clasificación supervisada por máxima probabilidad, en donde se generaron 7 clases (agua, asentamiento humano, agricultura de riego, agricultura de temporal, agricultura protegida, vegetación sana y vegetación seca), a continuación, se convirtió a archivo vector para el cálculo de superficie, además, con ayuda de la herramienta Excel 2010 se abrió el archivo .dbf para la generación de una tabla dinámica de las superficies por clase, para finalmente, anexar la información en una matriz histórica. De igual forma, se valoró el Índice de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés) por medio de la fórmula y la clasificación no supervisada de K-media, conformado por un método de agrupamiento; después se procedió a convertirlo en archivo shapefile, por medio de una constante comparación del archivo shape con la imagen satelital se eliminó los polígonos que no eran cuerpos de agua, en seguida, se agregó la columna de superficie y se calculó con la herramienta “calculate geometry”. Finalmente, por medio de Excel se abrió la base de datos del vector y se extrajo el valor de superficie de agua del lago y de la cuenca, para su uso en una matriz histórica.

Capítulo 1. Definición y características de la cuenca

Área de estudio

La cuenca Lerma Chapala forma parte de la región hidrológica No. 12, se ubica en el centro occidente del país con una superficie total de 54, 450 km², dentro de la región hidrológica se encuentran las microcuencas cerradas Pátzcuaro y Cuitzeo. La zona está integrada políticamente por cinco entidades federativas, con distinta superficie: Guanajuato (43%), Michoacán (30%), Jalisco (13%), estado de México (10%) y Querétaro (4%). Se considera como una región estratégica para el desarrollo de México, y concentra alrededor del 10% de todo el país, la cual genera alrededor de 10% del Producto Interno Bruto (PIB) (IMTA-SEMARNAT, 2009).

El lago de Chapala se encuentra en las coordenadas 20° 07' y 20° 21' latitud norte 102°40' 45'' y 103° 25'30'' longitud oeste, localizado en el occidente del país, principalmente en el estado de Jalisco y en menor superficie en el estado de Michoacán (86% y 14%, respectivamente), tiene una capacidad aproximada de 8 000 km³ y una superficie de 114 459 hectáreas; la profundidad varía según la zona, en promedio mide 7.7 metros, sin embargo es muy variable, en lugares como Jocotepec llega a medir de 4 a 5 m pero en aguas profundas se ha registrado hasta 11 m, teniendo cota normal, es decir, con una cota de 97.80 metros (1524.60 msnm). Debido a sus dimensiones es considerado el cuerpo lacustre más grande del país, y a su vez, la principal fuente de abastecimiento de agua de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), con aproximadamente 60% de aporte de agua (Cotler y Gutiérrez, 2005). Los municipios localizados en torno a él son: dentro del estado de Jalisco; La Barca, Jamay, Ocotlán, Poncitlán, Chapala, Jocotepec, Tuxcueca, Tizapán el Alto; y en el estado de Michoacán: Cojumatlán de Régules, Venustiano Carranza y Briseñas (CentroGeo, s/f).

Definición y características de la subcuenca en la zona de estudio

El lago se encuentra en una depresión hidrológica, en la cuenca Lerma – Chapala, donde aproximadamente el 30% del agua proviene del río Lerma, 8% del embalse y 62% del río Santiago, desembocan los ríos Huaracha y Duero en el río de la Pasión, el cual se origina en Michoacán y arroyos temporales que convergen en él, en la figura 6 se puede observar el drenaje natural y su ubicación geoespacial dentro de la cuenca Lerma Chapala (“CEA Jalisco - Lago de Chapala”, s/f).

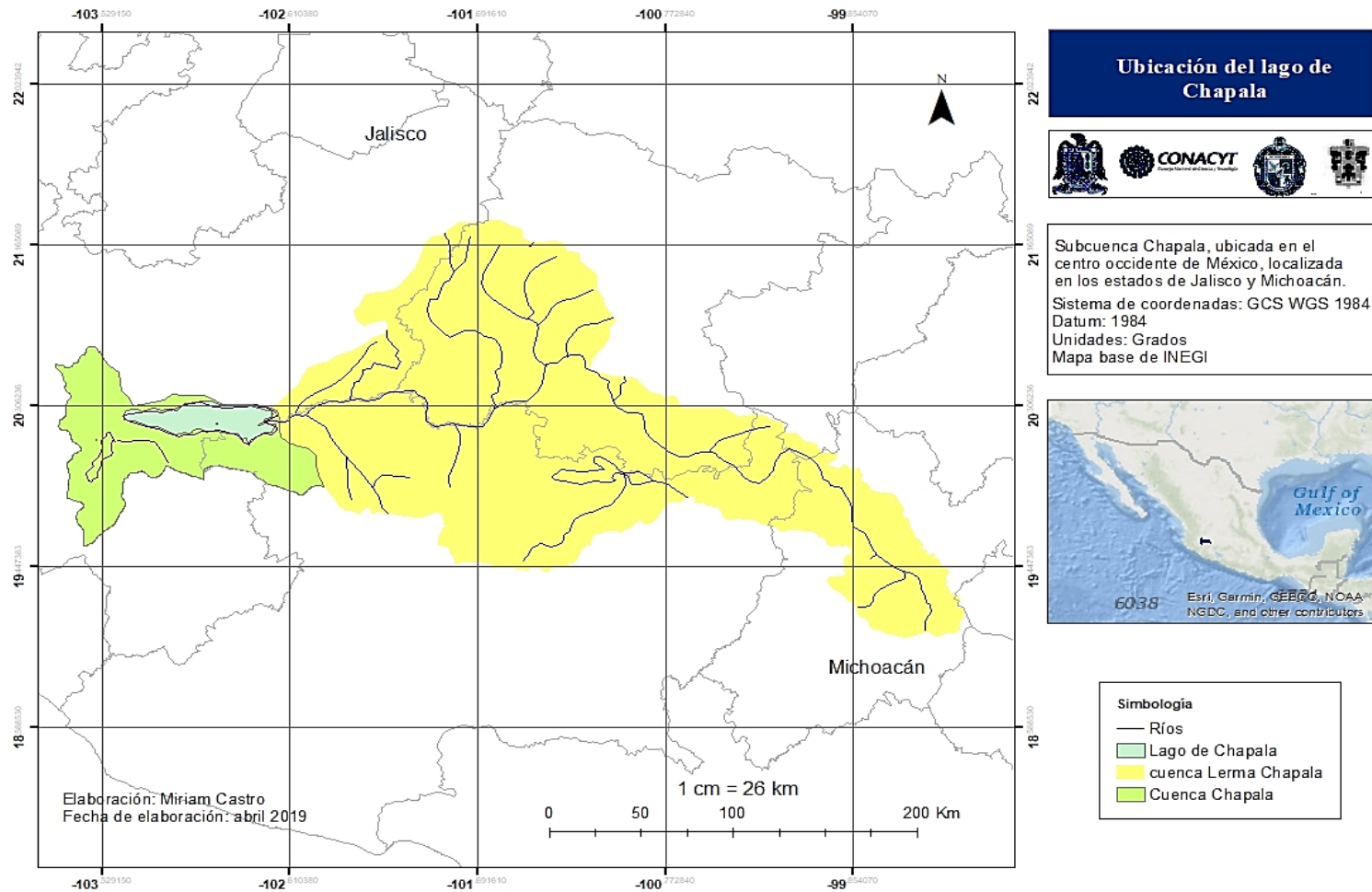


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio, subcuenca Chapala.

Tiene un clima semi-seco, con una temperatura media anual de 19.9° C, así como, una temperatura máxima de 27 a 30° C. Así mismo, presenta precipitaciones en verano, con un volumen anual de 875 mm (IMTA-SEMARNAT, 2009). En un análisis de temperatura máxima, mínima y de precipitación se observó que en la cuenca Lerma Chapala se pueden observar diferentes conductas, ejemplo de ello es la precipitación que debido a su altitud y características del clima de las 3 distintas regiones (alta, media y baja) presentan distintos volúmenes anuales. De acuerdo con la clasificación de regiones realizada por SEMADET (2006), la zona alta de la subcuenca se localiza dentro del estado de México con una precipitación media anual aproximada de 723 mm, la zona media comprendida en los estados de Michoacán y Guanajuato presenta una precipitación diversa siendo la zona de Guanajuato con menor precipitación de la subcuenca con una media anual alrededor de 602 y 658 mm y la parte baja de la cuenca ubicada dentro del estado de Jalisco, principalmente, muestra una precipitación con variaciones en la media anual que van de 681 a 756 mm al año. En la figura 7 se puede observar la comparación de la precipitación en la zona alta, media y baja de la cuenca Lerma Chapala.

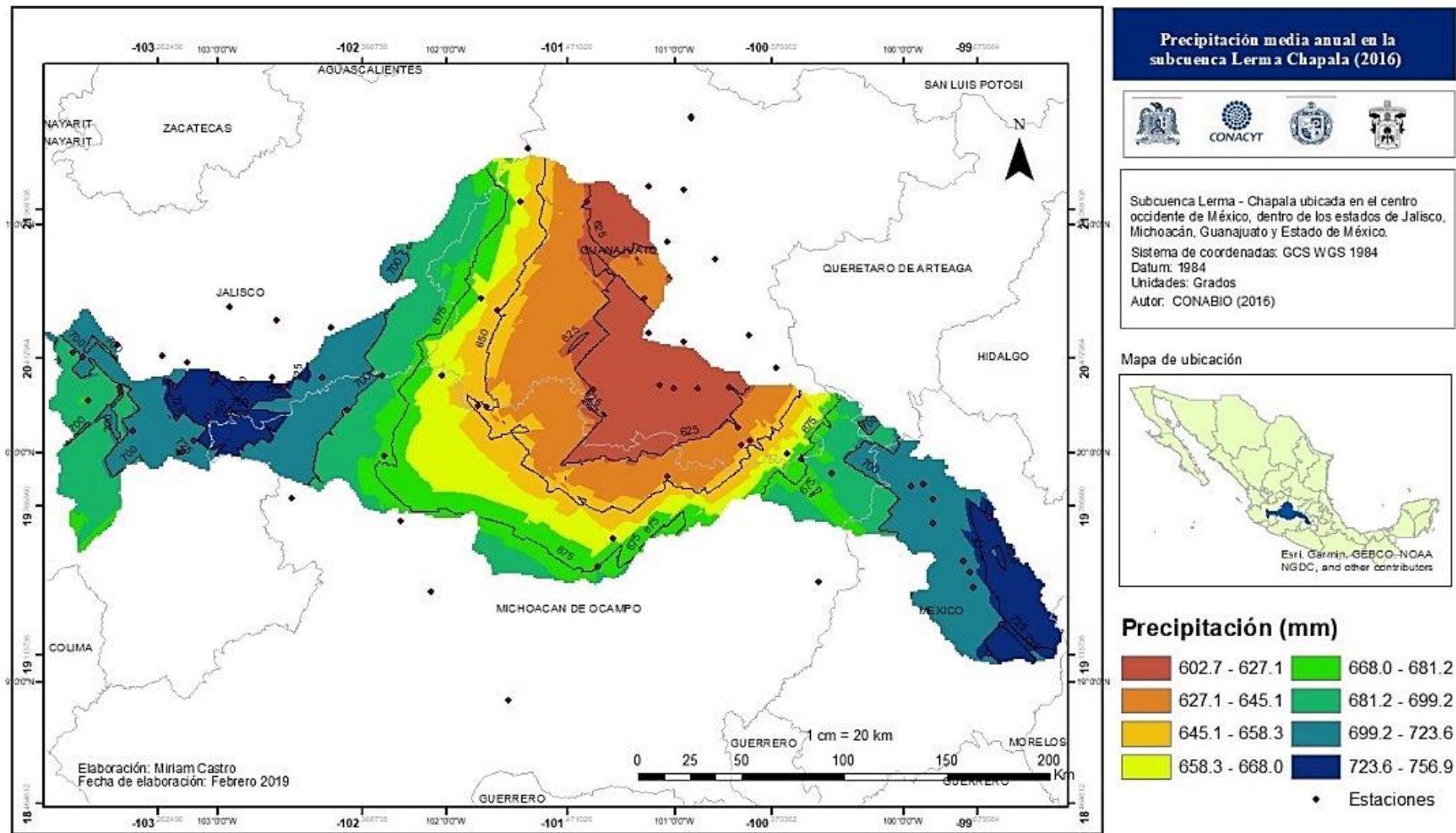


Figura 7. Precipitación media anual en las diferentes zonas de la subcuenca Lerma Chapala.

La temperatura es considerada como una de las variables con mayor vulnerabilidad debido a alteraciones climáticas, y la cual, se comporta según diferentes factores; como masa forestal y la altitud, la subcuenca Lerma Chapala presenta diferencias importantes en las tres regiones, alta, media y baja, respecto a la región alta se presentan las temperaturas más bajas de la subcuenca; con una temperatura máxima alrededor de 21 – 23 °C. La región media muestra un comportamiento más cálido, con una amplia distribución de temperaturas respecto de oriente a poniente, con una media anual de la temperatura máxima de 24° C, y al poniente, con temperaturas máximas más cálidas de hasta 28° C, finalmente, la parte baja de la cuenca muestra las temperaturas medias anuales más altas, mayormente, con temperaturas máximas alrededor a 28 °C y en menor proporción, zonas con temperaturas más bajas, entorno a 25° C. En la figura 8 se observa el comportamiento de la temperatura máxima en la subcuenca Lerma Chapala.

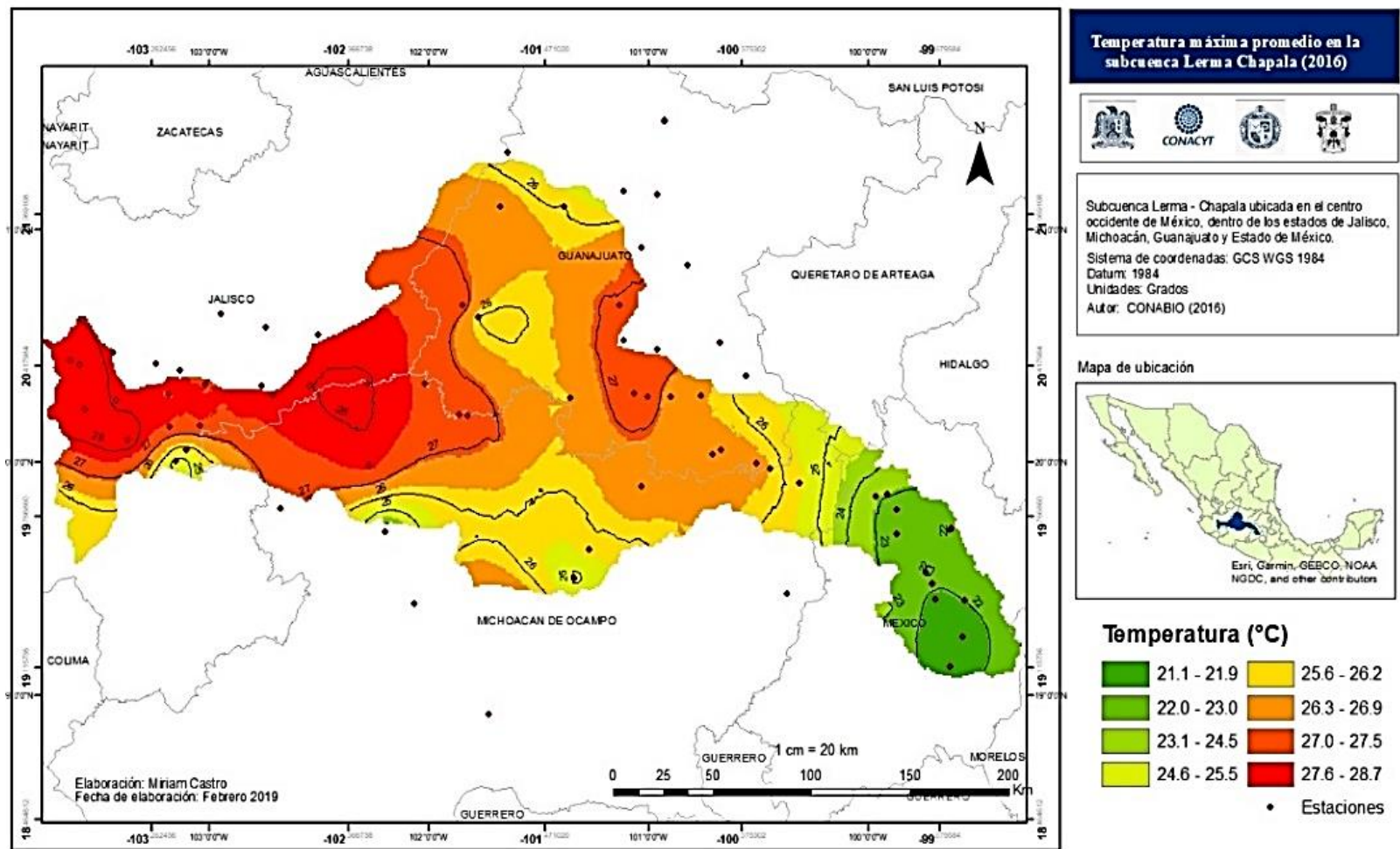


Figura 8. Mapa comparativo de temperatura máxima en la subcuenca Lerma Chapala

Respecto a la temperatura mínima se tiene un comportamiento un poco más homogéneo dentro de la cuenca, la zona alta presenta la temperatura mínima más baja con una media anual de 3 a 8 °C, en la región media se tiene una amplia distribución de temperaturas mínimas, ejemplo de ello es Guanajuato que presenta pequeñas zonas con una media anual alrededor de 8.5° C, y a su vez, presenta temperaturas más altas, entre 10 y 16 °C, no obstante, en el estado de Michoacán aunque tiene un similar comportamiento, se ubica una pequeña zona con una temperatura más cálida, con una temperatura mínima media anual de 21 °C, de igual forma en la zona baja, se exhibe un comportamiento cálido alrededor del lago de Chapala con temperaturas que van desde 13 a 16° C, así mismo, se presentan pequeñas zonas con una menor temperatura mínima, con una media anual de 9 a 10 °C. En la figura 9 se presenta el mapa del comportamiento de la temperatura mínima en la cuenca Lerma Chapala.

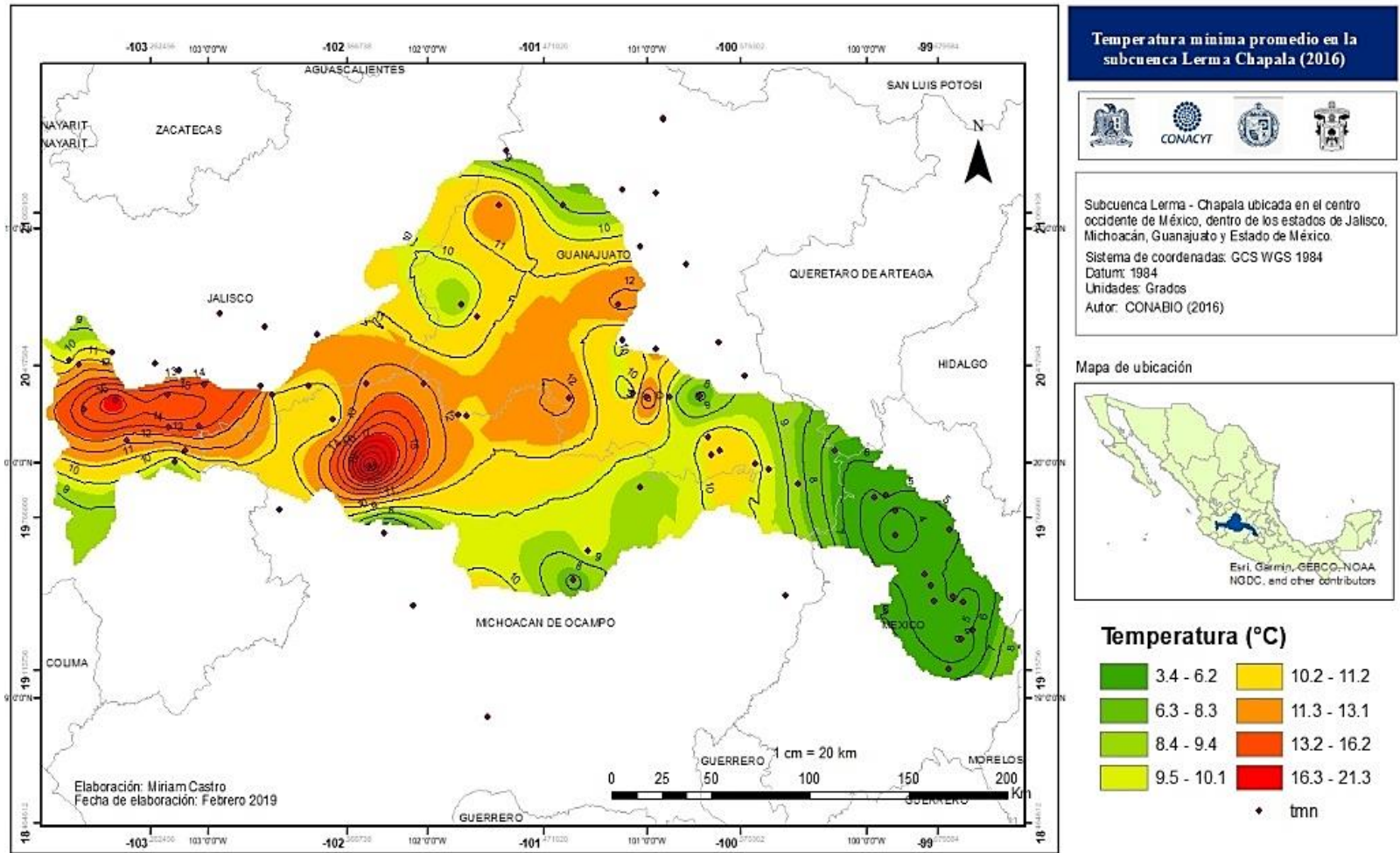


Figura 9. Mapa comparativo de temperatura mínima en la cuenca Lerma Chapala.

Se considera que a través de los años la cuenca Lerma Chapala ha sufrido modificaciones importantes, como consecuencia de la fuerte alteración antropogénica, y que, a su vez ha sido causada por el desarrollo económico que se ha impulsado en la región, es decir, la agricultura. En el período comprendido de 1976 – 2000 se registró una disminución de 817.2 km² de selva baja caducifolia y 1562.2 km² de bosques, con motivo de expansión de la agricultura (+107.86 km²) de pastizales cultivados o inducidos (+758.7 km²) de matorrales y bosques secundarios (+263.5 y +975.37 km², respectivamente). En una visualización más general de la subcuenca el 80 – 85% es utilizado para el sector agropecuario o forestal y alrededor del 3% presenta desarrollo industrial o urbano. Una de las afectaciones más importantes es la disminución del recurso hídrico en la región, ya que en el año 2007 se evaluó una pérdida del lago de Chapala de hasta 240 km² (Cotler *et al*, 2004). En las figuras 10 y 11 se compara la disminución de área forestal e incremento de áreas de plantación de 1998 y 2016 en la subcuenca Lerma Chapala.

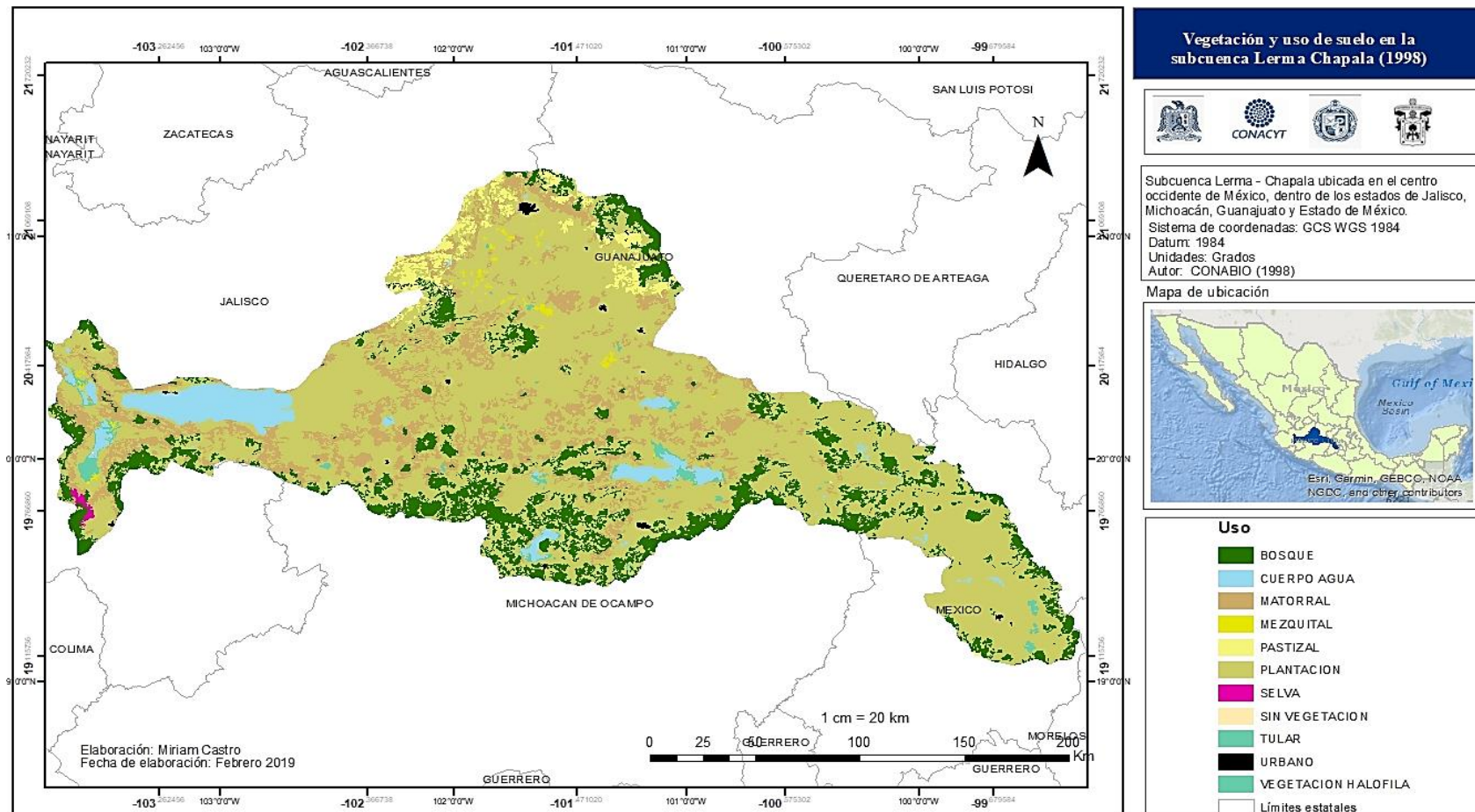


Figura 10. Vegetación y uso de suelo en 1998 de la cuenca Lerma Chapala.

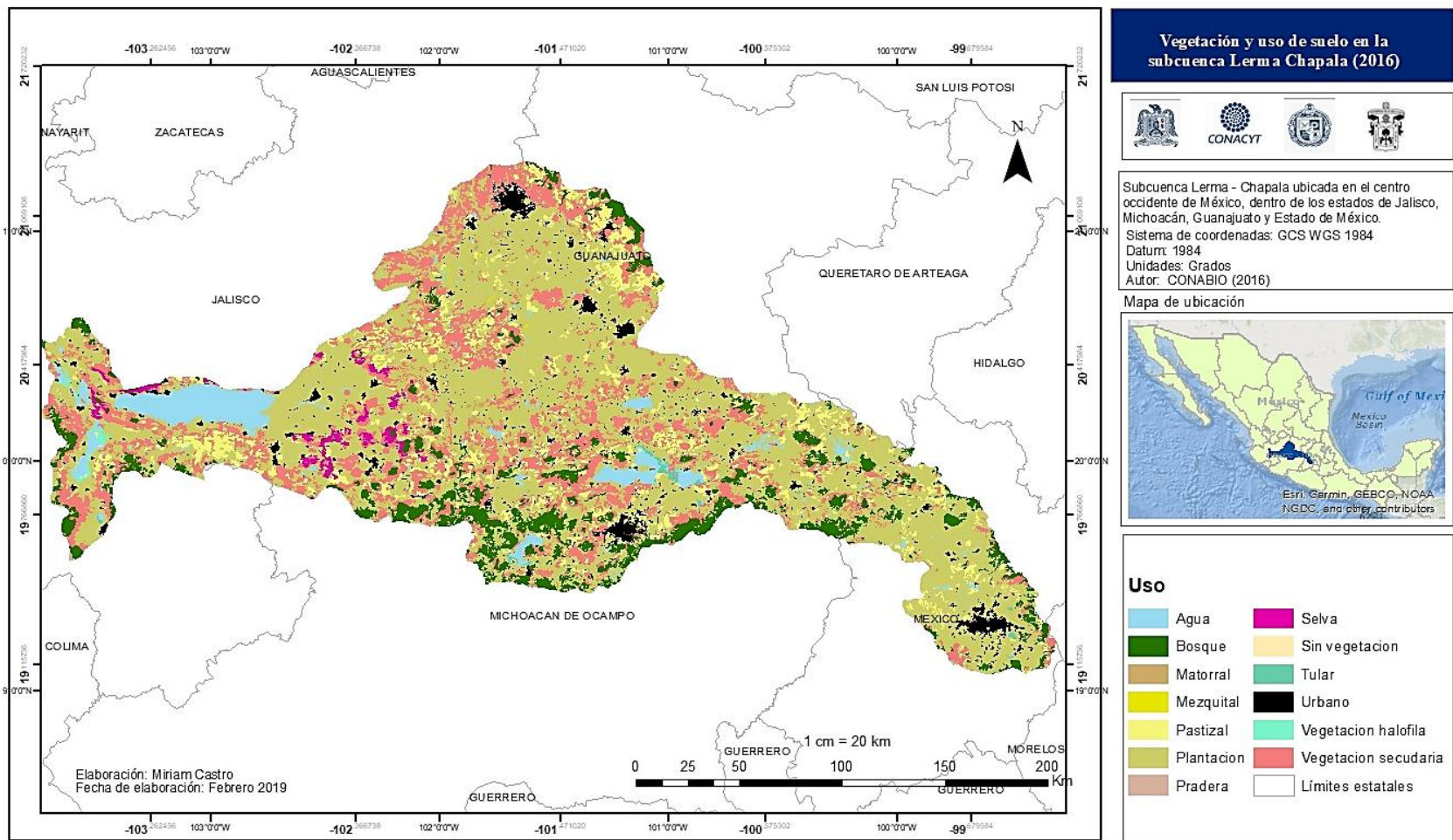


Figura 11. Vegetación y uso de suelo de 2016 en la cuenca Lerma Chapala.

En una investigación realizada por Priego *et al*, (2004) en torno al cambio de uso de suelo en la subcuenca Lerma Chapala durante el período comprendido de 1976 - 2000, se encontró que ha sido modificado profundamente su estructura, de acuerdo a los resultados se observó que la selva primaria de la zona ha disminuido drásticamente; pasando de más de 2 000 km² a alrededor de 1 300 km²; como segunda subformación con mayor tasa de cambio están los bosques primarios en 1976 que tenían una cobertura de 5 162. 5 km² pasando al año 2000 a solo 3 600.3 km²; en tercer posición están los patizales naturales donde se registró una cobertura de 3 067 km² y para el año 2000 tuvo una modificación a solo 2 797 km² y finalmente, se observo el cambio a través del tiempo de los cuerpos de agua, el cual, presentó un decremento de 1 726 a 1 629 km², con un cambio de 96.38 km². Cabe señalar que todas las modificaciones dieron lugar a zonas de cultivo o pastizales. Por el contrario, la única variable con crecimiento positivo en toda la subcuenca son los asentamientos humanos (con una tasa de cambio de 0.084), es decir, con un incremento de 816 km². En resumen, los resultados del análisis muestran una alta alteración de la cobertura vegetal o alto grado de antropización, en donde abarcan hasta 50% del territorio, como se muestra en la figura 12.

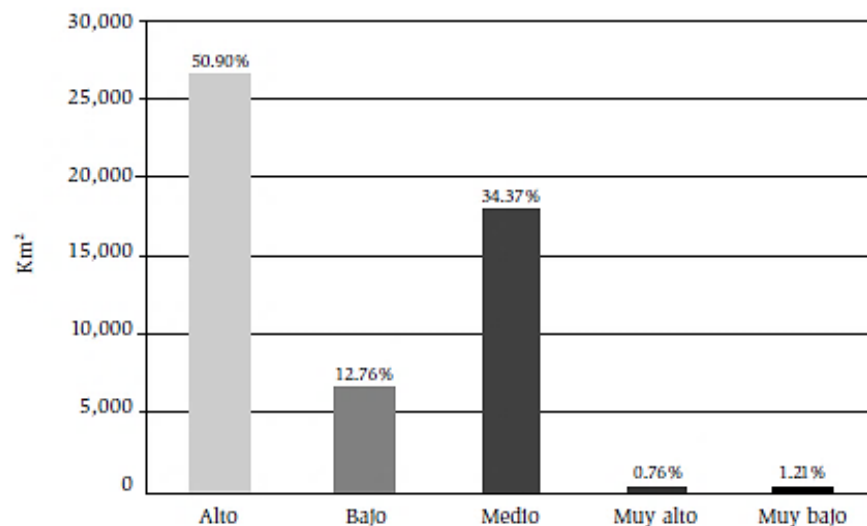


Figura 12. Histograma de frecuencia de los grados de antropización de la cobertura vegetal.

Finalmente, la investigación de Priego *et al.*, (2004) concluye que el desarrollo fomentado en la subcuenca, así como, sus alrededores ha originado un deterioro ambiental importante en la región, y como consecuencia, existe una modificación en el ciclo hidrológico, alterando el funcionamiento de la cuenca, es decir, ha habido una disminución de vasos reguladores que mitigan situaciones climáticas extremas, así como, una alta degradación de suelos.

La región de la cuenca Lerma Chapala ha presentado diversas problemáticas, como la escasez de agua, la contaminación en aguas superficiales, la sobreexplotación y la contaminación de acuíferos, la deforestación y la erosión de suelo en las partes más altas, los cuales, impactan directamente en la disminución del lago de Chapala. Según resultados de diferentes estudios se ha demostrado que existe una alteración en la cuenca, respecto al balance hídrico, en aguas superficiales y subterráneas; una de las causas es la demanda del recurso, el cual excede la cantidad de agua disponible, induciendo a la sobreexplotación de acuíferos, y a su vez, comprometiendo el ecosistema y el desarrollo futuro de la región. En la actualidad, se han presentado conflictos sociales debido a que limitan el aprovechamiento hídrico en actividades productivas, la extracción de agua en la parte alta compromete la disponibilidad del recurso en la zona baja de la cuenca, provocando alarma en el desarrollo en las diferentes regiones de la cuenca, así como, la conservación del lago de Chapala como regulador ambiental. Los problemas ambientales de la región hídrica originan en gran parte la problemática en la ribera de Chapala, debido a la función decantadora de los materiales arrastrados por el río Lerma, provocando problemas de eutrofización, y al mismo tiempo, se induce al desarrollo de lirio acuático y como consecuencia, se tiene una mala calidad del agua para consumo. Así mismo, al aumento de sedimentos y contaminación urbana industrial agropecuaria, así como, el abandono de la acuicultura, el mal manejo de pesquerías. Dicha problemática incorpora grandes costos económicos, sociales y ambientales, y como resultado se incrementan los precios del consumo, principalmente el agua (Meza-Villegas, 2010).

A partir de los años 50's hubo un incremento demográfico importante en la ciudad de Guadalajara y por consecuencia la demanda de agua aumento considerablemente, aunado a un déficit en la cantidad de precipitaciones en la región que duró 13 años. En el año de 1953 se firmó el convenio del río Santiago, el cual, acordaba el abastecimiento de Guadalajara por

medio del río Lerma, que alimenta al lago de Chapala, proponiendo que el caudal iba a ser suficiente para solucionar la demanda de la ciudad. En la década de los sesentas la subcuenca Lerma Chapala se orientó a la industria, consecuentemente los centros urbanos crecieron, pasando a ser una de las cuencas más importantes del país con suficientes recursos para asegurar el desarrollo de la región, un recurso con un importante papel fue el agua, no obstante, la demanda empezó a rebasar a la oferta disponible, viéndose limitado el desarrollo de la región. Como consecuencia, en los años 70's se creó el Plan Lerma de Asistencia Técnica (PLAT) donde indicaba el desequilibrio entre la disponibilidad de agua y la demanda, además se puntualizaba un factor importante, la demanda de la Ciudad de México sobre el río Lerma donde se extraía agua para uso doméstico e industrial, es decir, la deficiencia de agua se daba desde la región alta dejando mermada la disponibilidad del recurso en la zona baja de la cuenca. A pesar de la problemática, en los 80's se construye un acueducto que va desde el centro del lago, con el motivo de extraer el agua con menor cantidad de contaminantes para aliviar la demanda de agua de la Zona Metropolitana de Guadalajara. No obstante, el desarrollo urbano e industrial iban en aumento y con ello incrementaba la explotación del recurso; la deficiencia generada en la región abrió paso a la creación de una presa en el kilómetro 30 del acueducto, con el propósito de regularizar la operación del sistema, así como, tener una reserva de agua. Así mismo, la oferta del recurso hídrico no alcanzaba a cubrir la demanda de las necesidades de la subcuenca en los diferentes sectores, lo que confirma un desarrollo no sustentable en la región y por consecuencia de toda la ribera provocando una disminución su superficie. Fue en 1991 cuando se presentó una crisis donde la cota bajo hasta 91.91 metros, como consecuencia de la cantidad de lluvia registrada de solo 853 mm, en los siguientes años, de 1992 a 1994, se pudo recuperar un poco, sin embargo, sus cotas no alcanzaban a mitigar el impacto de la sequía del 91, y solo alcanzó un máximo nivel con 94.55 m en 1994. La tercera crisis sucedió a finales del siglo XX y principios del siglo XXI donde volvió a bajar el volumen del lago hasta 93.12 m, sin embargo, la causa principal del decrecimiento de la extensión del cuerpo era la explotación hídrica en la región alta y media de la subcuenca, en otras palabras, la sobreexplotación de la cuenca alta supera la aportación a la región baja por lo que es muy difícil la conservación del cuerpo regulador para un desarrollo sustentable (Durán y Torres, 2003).

Para el desarrollo sustentable de una cuenca es importante la correcta administración del recurso hídrico, contrario a esto, en la cuenca Lerma Chapala se ha incentivado el desarrollo industrial y agricultura de forma intensiva, dando lugar a la construcción de grandes presas, y a su vez, generando enormes impactos en equidad, gobierno y poder, así como, comprometiendo el balance natural en la región. La cuenca presenta un total de 552 presas y bordos, donde más del 50% se encuentran en 5 subcuencas: Solis (78), Lerma (62), Duero (54), Tepuxtepec (49), y Alto Lerma (43), en seguida se muestra un gráfico de frecuencia en la figura 13.

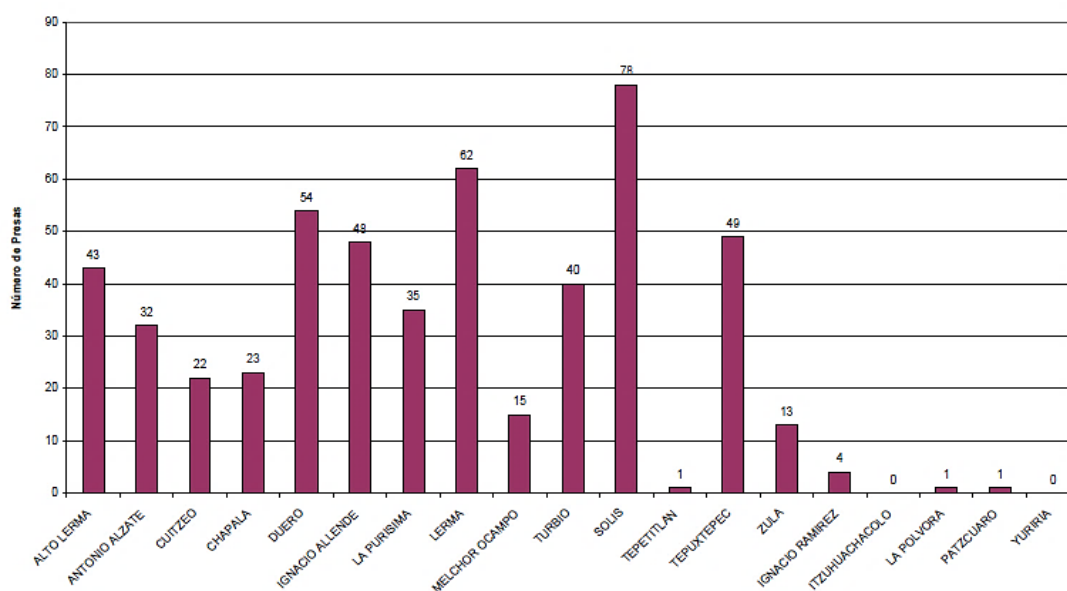


Figura 13. Presencia de obras hidráulicas dentro de la cuenca Lerma Chapala.

La relación entre el número de presas y el tamaño de la microcuenca muestra una correlación positiva, es decir, las regiones más grandes son las que tienen un mayor número de obras hidráulicas. Conforme al tamaño de las presas en la zona, 25% son grandes, 14% son medianas y 43% son chicas, sin embargo, existe un desconocimiento del 18% de las presas porque son propiedad privada. Así mismo, el período de construcción de las obras fue principalmente en el período de 1950 – 1990 en donde se construyó 65.8% de presas existentes, el objetivo de la construcción fue el fomento a la agricultura en la cuenca. Sin embargo, durante las últimas décadas hubo un impulso industrial en la región sin considerar

el impacto generado al ambiente natural, ocasionando el deterioro ambiental de la región (Cotler y Gutiérrez, 2005).

Del mismo modo, el cuerpo de agua presenta problemas en torno a calidad de agua, es considerada zona vulnerable a la contaminación consecuencia de los drenajes agrícolas, aguas residuales domésticas e industriales. El transporte de metales pesados en los sistemas hídricos tienen una generación a partir de procesos físicos, químicos y biológicos; en donde los sedimentos toman relevancia en el transporte de sustancias orgánicas o inorgánicas, los contaminantes tienen como peculiaridad su acumulación en materiales arcillosos; dentro de la cuenca se encuentran diferentes industrias, las cuales, descargan el agua sin tratamiento previo; peletera (1 095), pecuaria (645), textil (554), establecimientos de servicio (454), industria alimenticia (329), metal-mecánica (110), petroquímica (99), química y farmacéutica (74), minera y cantera (41), madera y derivados (25), destiladora (16), electromecánica (17), metalúrgica (13) e industria pesticida (4). Según la información recolectada, los balances de masa de concentración contaminante se identifican en los municipios de León con 19 ton/día de sólidos suspendidos totales (SST), Querétaro con 15.5 ton/día de SST; la mayor aportación de cadmio se da en Salamanca en sedimentos suspendidos; las mayores aportaciones de zinc se muestran en Querétaro y Celaya, no obstante, río abajo se ve una disminución del mismo; en Celaya, Salamanca y León se muestra un alto residuo de plomo. En resumen, dichos resultados se explican como consecuencia de la movilidad relativa de las condiciones ambientales de las regiones por medio de su transporte en sedimento suspendido, de la misma forma, el sedimento del fondo funciona en una etapa de acumulación de los contaminantes (Hansen *et al*, 1995).

En el estado de Michoacán se han presentado consecuencias de lo anterior, se estimó que en 2010 se habían perdido cerca del 70% de fuentes de agua consecuencia del azolve, sobreexplotación y contaminación (Aguilon, 2006). En una investigación realizada por Chávez *et al.*, en 2011 donde se seleccionaron 16 puntos de muestreo a una distancia corta del lago de Chapala, con el objetivo de analizar pH, salinidad, metales pesados (Fe, Mn, Pb y Cd), conductividad eléctrica (CE), Cl, P, coliformes fecales e índice de calidad de agua (ICA); los resultados del muestreo indicaron que existe una mayor concentración de contaminantes en la superficie del cuerpo en aguas abajo, caso contrario fue en la zona

lacustre que presentó una menor calidad del agua comparada con los ríos o presas de la zona, por lo tanto, se puede concluir que los drenajes agrícolas y las aguas residuales son las principales fuentes de contaminación de los cuerpos de agua.

El río Lerma tiene un flujo a través de la cuenca Lerma Chapala Santiago y es el principal alimentador del lago de Chapala, sin embargo, desde aguas arriba se inicia con su contaminación, se estima que por alrededor de 52 500 km² recibe los desechos urbanos, agrícolas, industriales y agua residual; provocando un flujo altamente contaminado, y en adición con corrientes de aire, en donde se transportan contaminantes hasta llegar al cuerpo de agua de Chapala, sin embargo, la predicción de flujo de contaminantes en zonas lacustres es un problema muy complejo. En un estudio se intentó identificar el flujo y distribución del fosfato desde su salida de las plantas de tratamiento alrededor de la zona lacustre y desde el flujo de entrada del río Lerma, con una dirección del viento predominante de este a oeste a 10 km/h. Se encontró que en el período de 1989 a 1991 la zona lacustre tenía una concentración de fosfato de aproximadamente 0.5 mg/l mientras que el río Lerma tenía un valor promedio de 1.2 mg/l, lo cual, indica una mayor presencia del elemento en aguas arriba de la cuenca, no obstante, implica una falta a la normativa vigente la NOM- 001-SEMARNAT- 1996. Sin embargo si se agrega el drenaje natural que llega al lago, el cual, tiene una alta concentración de nutrientes, y que origina la eutroficación, y a su vez, estimula el crecimiento del lirio acuático, y que tiene como característica particular el origen de un control natural de los agroquímicos provocada de manera involuntaria, que actúa como fitoremediador, ayudando en la remoción de nutrientes y/o metales pesados del agua (Bautista-Ávalos, 2013).

Actualmente, se ha continuado con diversos estudios de calidad de agua y su comparación entre el lago de Chapala y el río Lerma, la importancia del recurso, así como, la necesidad de toma de decisiones más rápidas que incentivan el desarrollo de nuevas técnicas para una evaluación en menor tiempo, sin embargo, los resultados de las evaluaciones varían según la época del año, caso contrario sucede en el río Lerma que está altamente contaminado por desechos industriales, urbanos y agrícolas en cualquier periodo de tiempo. Se estima que la mayor cantidad contaminante que recibe la cuenca es en la región alta, en la zona media tiene

un sistema léntico⁴ y su mayor entrada es agua residual de las diferentes actividades, finalmente, en la cuenca baja se presenta alta generación de lirio acuático. Cabe agregar que el lago de Chapala tiene poca o nula estratificación, debido al patrón de vientos y a su profundidad, generando un continuo movimiento, y a su vez, formando un comportamiento estable en los indicadores del índice de calidad del agua (ICA). Es decir, el lago de Chapala presenta mejores valores de ICA en la zona occidente a comparación del río Lerma, que generalmente muestra contaminación por nitratos, fósforo, ortofosfatos; la presencia de los contaminantes anteriormente mencionados es creado por un ambiente de variabilidad en la precipitación, alta evaporación, la construcción de presas a lo largo de la cuenca provoca una mayor concentración contaminante entre ellos plaguicidas, metales pesados, sales y nutrimentos inorgánicos. De acuerdo con la clasificación de SEMARNAT el río Lerma tiene aguas consideradas como altamente contaminadas a contaminadas, solo para uso industrial y agrícola con tratamiento previo y se clasifica como inaceptable en los meses de sequía para pesca y vida acuática, así como, en los meses de julio y noviembre solo la presencia de organismos muy resistentes. La evaluación de ICA coincide con el Índice Biótico Extendido (IBE) que las clasifica como agua de alta a severa contaminación, la menor presencia de macroinvertebrados se encuentra en la cuenca alta, en tanto en la cuenca baja se encuentra un mayor número de macroinvertebrados, no obstante, las especies encontradas son facultativas⁵, la mayoría son filtradores, descomponedores o detritívoros, adaptados a condiciones anóxicas (<1 mg/l) o hipóxicas (2-4 mg/l) ocasionadas por la descomposición de materia orgánica y la baja velocidad de la corriente (López-Hernández *et al*, 2007).

Es importante mencionar que en el estado de Jalisco se han presentado efectos de la variabilidad climática, de manera que la humedad relativa ha disminuido considerablemente, generando días más secos y como consecuencia directa, infecciones respiratorias. Anteriormente se presentaba una humedad relativa de hasta 20%, en la actualidad ha descendido hasta 13 - 9%; Los cambios atmosféricos causados por la contaminación, son la inversión térmica, el efecto invernadero, la lluvia ácida y la fragmentación de la capa de ozono, y dichos efectos favorecen la acumulación de gases contaminantes, los cuales tienen efecto directo en la cantidad de radiación UV recibida en la Zona Metropolitana de

⁴ Agua sin movimiento, estancada.

⁵ Tolerantes a la contaminación

Guadalajara (Carrillo, s/f). En el estado de Jalisco se ha registrado un aumento de temperatura, en el período de 1981-2010 se mostró un incremento de 0.6°C en las zonas continentales y de 0.2 a 0.4°C en zonas costeras. Dicho aumento guarda estrecha relación con el reportado a nivel global (Davydova y Frias, 2016).

La región que comprende al lago de Chapala presenta gran complejidad en el uso de los recursos naturales, como consecuencia del crecimiento demográfico, generando impactos negativos (agricultura intensiva, ganadería, industria alimenticia, contaminación de agua residual, entre otros). En adición, la región se enfrenta a uno de los retos más importantes de este siglo, la alteración climática (Bautista-Ávalos, 2013), y como consecuencia, en la zona comprendida por en la ribera de Chapala se ha observado un aumento de evaporación y temperatura, por lo tanto, ha presentado una disminución importante en el nivel del lago. Según datos de Comisión Estatal del Agua, a través del tiempo se ha visto una modificación negativa en el nivel del cuerpo de agua, y que actualmente cuenta con una cota del 65.83% de su almacenamiento. Por lo tanto, se ha visto disminuida su capacidad amortiguadora, prueba de ello, son los problemas presentados en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), presentándose frecuentemente altas temperaturas, por esta razón se dice que el problema no sólo se limita a nivel región, sino que afecta a nivel estatal (Loera, 2010).

A partir de diferentes metodologías se ha intentado sustentar los cambios históricos del volumen de agua en el lago, incluso los árboles más longevos pueden dar una pista del comportamiento de la precipitación a través del tiempo, en una investigación entre universidades e instituciones se midió por medio de anillos de crecimiento de *Taxodium mucronatum* (coloquialmente conocido como ahuehuete) ubicados en la ribera del lago, en donde se concluyó que el período comprendido de 1959 a 2003 fue la de mayor correlación entre crecimiento del árbol y recuperación del lago, no obstante, existen años donde no se presenta ningún desarrollo, por lo que, esa condición se traduce como poca precipitación. Es decir, según los niveles reconstruidos se encontró una variabilidad elevada con una mayor decadencia en los últimos 30 años a consecuencia del desvío del recurso para otros usos, evitando una recuperación similar a lo registrado históricamente según la reconstrucción (Villanueva *et al.*, 2010).

Además, en términos de la cuenca Lerma Chapala se han presentado problemas de la variabilidad climatológica, por lo cual se considera que tiene regiones con una alta vulnerabilidad con una precipitación anual de 550 mm, debajo del promedio anual del país (760 mm); la baja precipitación y las escasas plantas de tratamiento han ocasionado que los ríos cada vez estén más contaminados. Cabe agregar que las tendencias muestran que habrá fuertes modificaciones en el ciclo hidrológico natural, con una pérdida por encima del 21% de las escorrentías superficiales actuales en la región alta de la cuenca. La zona media está considerada como la de mayor sobreexplotación de los acuíferos, y poca o nula presencia de cuerpos superficiales, aunado a las actividades industriales promovidas en la región, por consiguiente, se tiene una alta contaminación del recurso en la zona y a su vez comprometiendo el desarrollo sustentable del lugar y probables problemas futuros con la disponibilidad de agua para la población. En la región baja, donde se encuentra el lago de Chapala, se ha tenido profundas modificaciones en el ciclo hídrico, durante 2001 y 2002 los niveles del lago llegaron a un punto alarmante, no obstante, en los últimos años ha mejorado su nivel y, sin embargo, se espera que en un futuro cercano pueda tener una reducción en su volumen y por consiguiente los problemas con la calidad del agua podrían aumentar (Rivas, *et al.* 2012).

Uso de tecnologías geoespaciales para delimitar y representar a la cuenca Lerma Chapala

El uso de las diferentes metodologías dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la delimitación de una zona de estudio, se considera como una herramienta de amplia utilidad en diversas áreas de conocimiento. El análisis espacial tiene dos premisas importantes de mencionar; la observación de los datos espaciales y la definición geométrica de las entidades espaciales tomando en cuenta el espacio geográfico; las dos deducciones son fundamentales para un correcto estudio (Buzai, 2009).

Se considera a la percepción remota como una herramienta atractiva debido a que es posible representar a la superficie de la Tierra, y a su vez, cuenta con escalas de datos espaciales y temporales. Cabe señalar, que la principal ventaja es la recolección de información multitemporal, en donde se puede delimitar concretamente las regiones

hidrológicas, del mismo modo permite la observación de cambios en la superficie de la Tierra (Marsik *et al.*, 2011).

Procesos en SIATL

El Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) es una aplicación geoespacial de análisis de cuencas y determinación de flujos en ríos y arroyos, el cual, se conforma de diferentes capas de información y funciones que ayudan a la comprensión de la zona de estudio, a favor del desarrollo sostenible de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, s/f).

Por medio de SIATL se calculó el escurrimiento, en donde se agregó el coeficiente, así como, el período de retorno, así mismo, el análisis tiene como premisa que los ríos principales y la subcuenca recibe la aportación de una o más subcuencas adyacentes. La fórmula utilizada es la racional americana, por lo que es importante tomar en cuenta las recomendaciones que aporta la teoría hidráulica; de igual manera, para el cálculo se considera la escorrentía natural, es decir, sin presencia de presas, bordes o cualquier construcción que pudiera alterar el comportamiento natural; finalmente, se obtuvo un gráfico del perfil de elevaciones del cauce principal, el río Lerma.

Para el cálculo de lluvia probabilística se hizo mediante datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), por medio de procesos de interpolación y extrapolación de datos históricos de 50 años de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los cálculos se consiguen al integrar el área drenada con el mapa con formato ráster de acuerdo con el período de retorno y duración de lluvia previamente seleccionada. La fórmula utilizada es para la determinación de intervalos en la estratificación, es decir, con la regla de Sturges.

La distribución de la vegetación y uso de suelo fueron analizados a través del área de drenaje seleccionada anteriormente con la capa de uso de suelo y vegetación 1: 250 000 de la serie IV, posteriormente, se obtuvo un recorte del polígono de acuerdo del área de captación para finalmente recalcular las áreas y aplicar el conteo para la clasificación.

Inicialmente, se descargó el archivo continuo de elevaciones mexicano (CEM) de la República Mexicana, a través del portal de INEGI (www.beta.inegi.org.mx), a continuación se analizó por medio de ARCGIS, en donde se hizo un recorte de la cuenca Lerma, se proyectó la altitud; y como resultado se observó que la zona alta corresponde al estado de Jalisco, mientras que la zona de Michoacán se le considera como terreno inundable, por su característica plana, se analizó la topografía del lugar desde 1985 a la fecha con motivo de estudiar si la altimetría de la zona de estudio se había modificado con los años, sin embargo, no se encontró cambio alguno a través del tiempo. Posteriormente, se corrigieron los errores de vegetación y topográficos del archivo, con la finalidad de determinar la dirección y acumulación de flujo; dando como resultado la identificación de las microcuencas, sus drenajes principales, así como el análisis de las cuencas experimentales⁶ dentro de la cuenca Chapala.

Representación de la cuenca, sus drenajes principales y escurrimientos

De acuerdo con el perfil de elevación (figura 14) se distingue por la fluctuación entre kilómetros, el área con menor elevación corresponde a Michoacán, mientras que la zona con mayor altitud es parte del estado de Jalisco.

⁶ Cuencas homogéneas en lo que se refiere a cobertura del suelo con características uniformes en un área menor de 4 km²

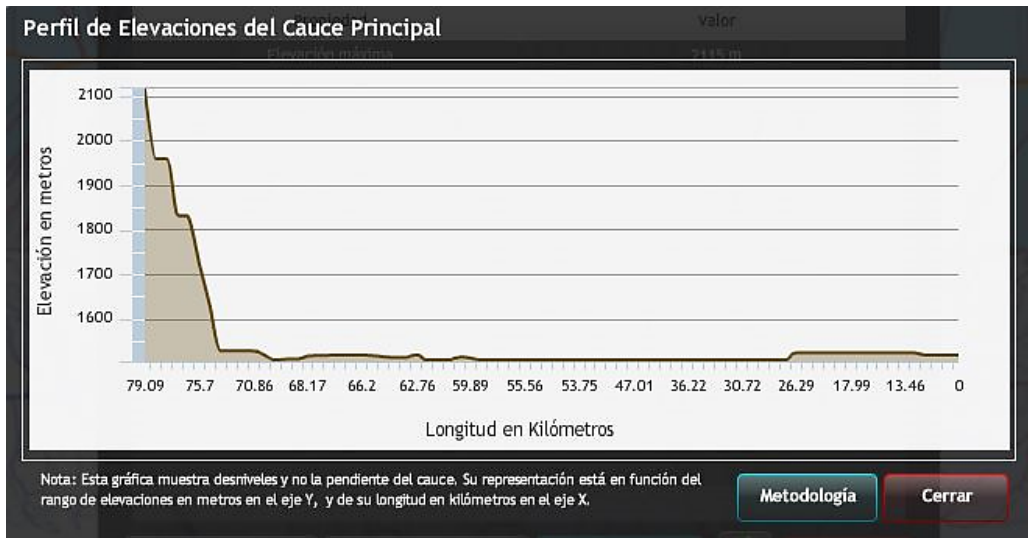


Figura 14. Elevación del río Lerma, cauce principal del lago de Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

De acuerdo con el análisis en SIATL, los meses con mayor temperatura media en el lago de Chapala corresponden de abril a junio, con alrededor de 18°C, caso contrario, en los meses de enero, febrero y diciembre son los meses más fríos, con una temperatura aproximada a 13°C (figura 15).

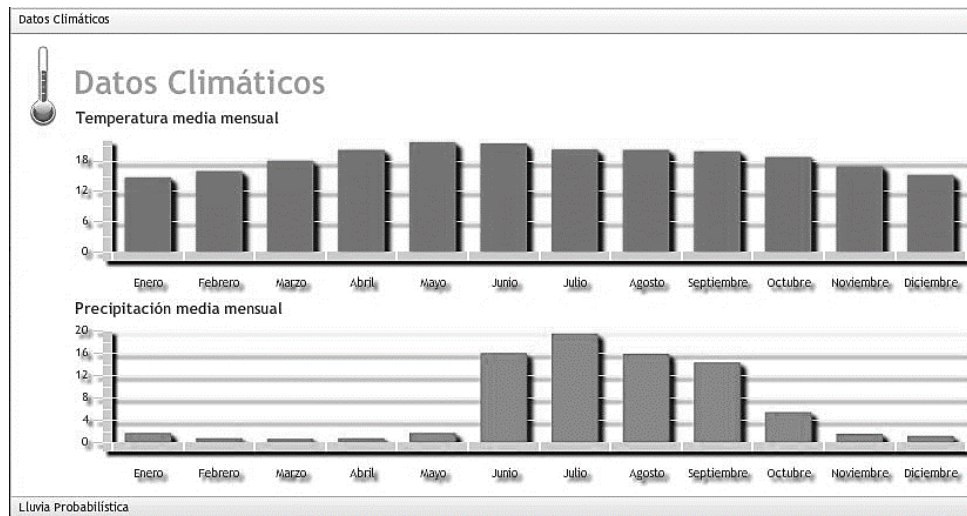


Figura 15. Comportamiento de la temperatura y precipitación en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

Por medio de SIATL se analizó con un periodo de retorno a 20 años, las lluvias intensas, las cuales tienen una mayor probabilidad de eventos de hasta 98.664 mm, con una frecuencia de 7 incidentes en el mismo periodo de tiempo (figura 16).

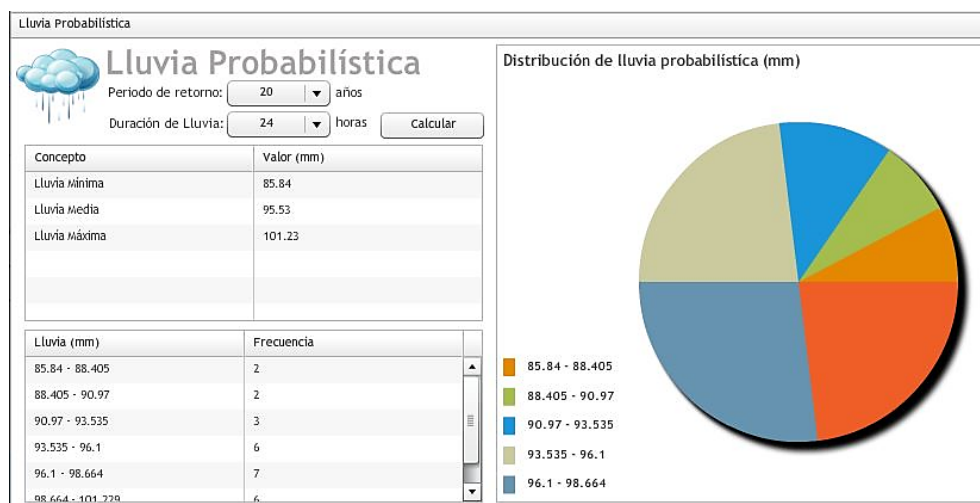


Figura 16. Lluvia probabilística con un período de retorno de 20 años en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

Se identifica que la cuenca Chapala contiene al vaso regulador más grande del país, es decir, el lago de Chapala que cuenta con 1087.35 km² (48.62%), en segunda posición está el área destinada a la producción agrícola, pecuaria y forestal que tiene 432.816 km² (19.35%); en seguida está la selva caducifolia con una proporción de 334.593 km² (14.96%), en cuarta posición está la vegetación inducida que comprende un terreno de 234.945 km² (10.50%), finalmente las distribuciones con menor superficie son; el bosque de encino con 102.14 km² (4.56%), la zona urbana con 25.73 km² (1.15%), el bosque de coníferas con 15.29 km² (0.68%), los asentamientos humanos con 2.65 km² (0.11%) y como matorral xerófilo solo 0.884 km² (0.039%) (figura 17).

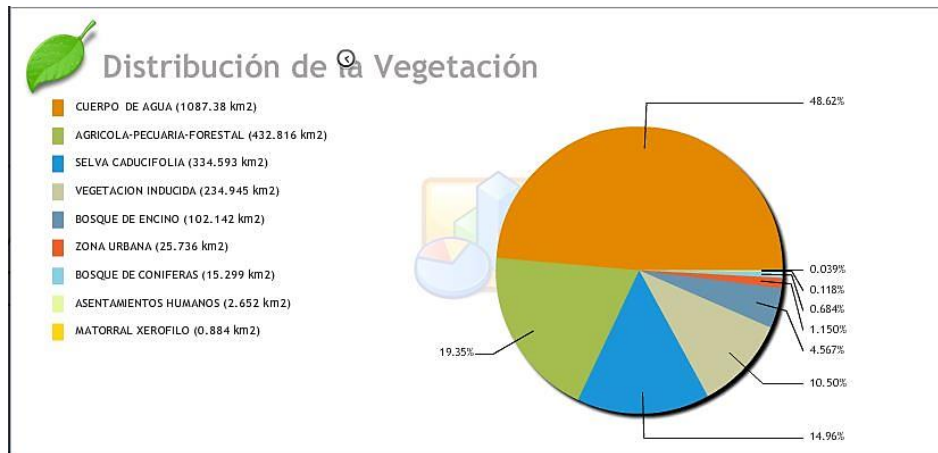


Figura 17. Tipo de vegetación en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

Los cuerpos de agua en la cuenca se restringen en su mayoría por ser intermitentes, ejemplo de ello, es la laguna de Sayula y San Marcos; sin embargo, el lago de Chapala y pequeñas zonas como Cajititlán y la laguna de Zapotlán son perennes, aunado a que la mayoría de los flujos son intermitentes, lo que hace que sea más vulnerable la pérdida de la superficie del cuerpo de agua (figura 18).

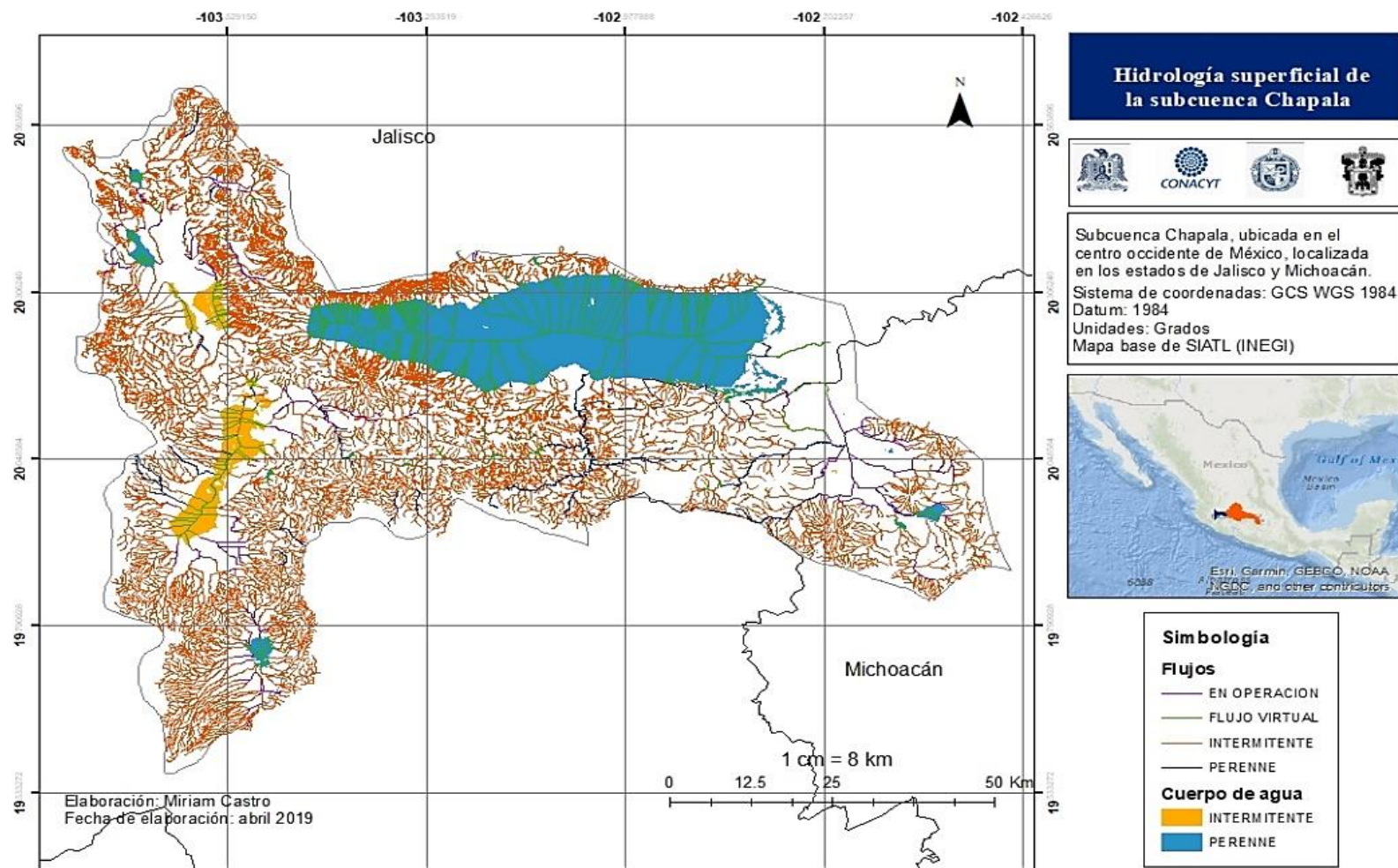


Figura 18. Red de drenaje y cuerpos de agua en la subcuenca Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

En la figura 19 se distingue la cantidad de poblaciones alrededor del lago, las cuales se ubican a menos de 500 m y en donde se pueden localizar 210 localidades rurales y urbanas, cabe señalar que los asentamientos humanos se encuentran principalmente en el estado de Jalisco.

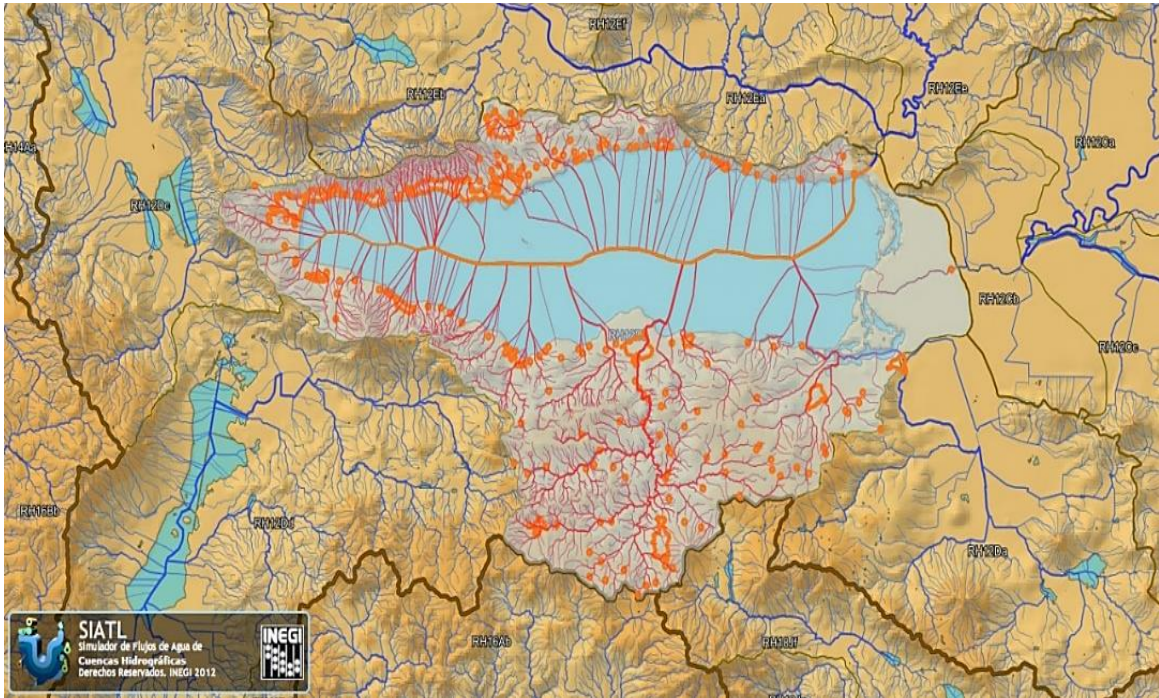


Figura 19. Localidades a 500 metros alrededor del lago de Chapala. Obtenido de SIATL (2019).

La figura 20 muestra la altitud de la cuenca, donde se visualiza que la parte alta de la microcuenca se encuentra en el estado de Jalisco con una altitud de 4798 msnm y la zona baja se presenta en Michoacán con 1285 msnm.

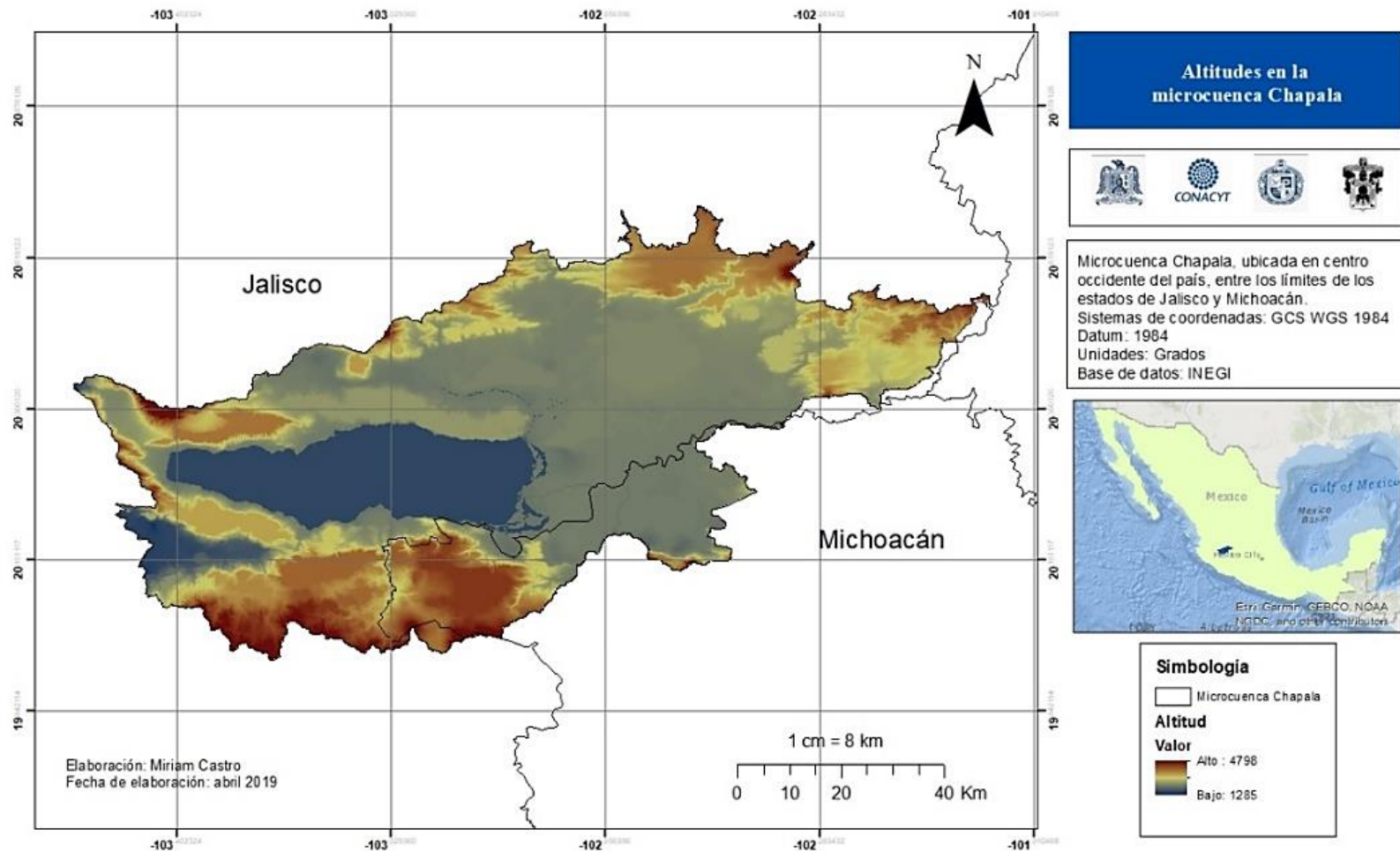


Figura 20. Altitud en la subcuenca Chapala. Datos obtenidos de INEGI.

En la figura 21 se observa la principal red de drenaje de la microcuenca, la cual es el río Lerma por sus condiciones perennes, es decir, es la principal fuente de abastecimiento, cabe señalar que la mayoría de los flujos son intermitentes y los cuales, solo alimentan al lago en el temporal de lluvias. Sin embargo, el lago se encuentra en la depresión hidrológica Lerma – Chapala, donde aproximadamente el 30% del agua proviene del río Lerma, el 8% del embalse y el 62% del río Santiago. Cabe señalar, que los ríos Huaracha y Duero desembocan en el río de la Pasión, el cual se origina en Michoacán, así como, arroyos temporales que convergen en él y que finalmente desaguan en el lago de Chapala ("CentroGeo", s/f).

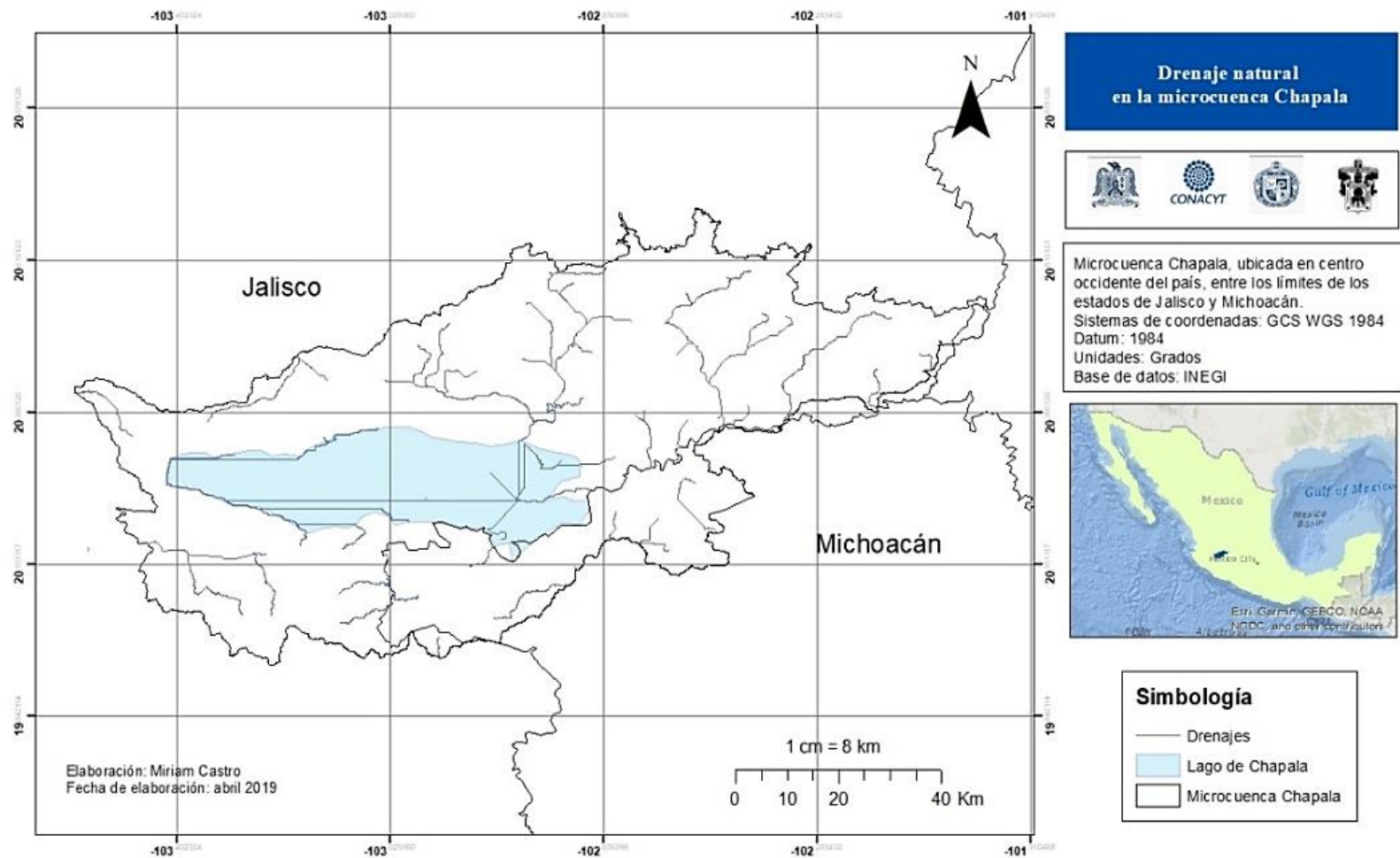


Figura 21. Red de drenaje en la subcuenca Chapala

A pesar de presentar flujos puntuales alrededor de toda la cuenca, la mayor corriente se localiza dentro del lago, es decir, se encuentra en la zona perteneciente al estado de Jalisco y de forma muy tenue en Michoacán (figura 22).

La acumulación de flujo se encuentra en mayor proporción en Jalisco con grado 16 y Michoacán tiene una menor presencia, de grado 4. Cabe señalar, que el área con menor acumulación presenta reducción o degradación en los fenómenos de sequía (figura 23).

En la figura 24 se muestra la cuenca Chapala, que a su vez, se divide en cuencas experimentales, es decir, cuenta con subcuencas relativamente homogéneas de acuerdo a la cobertura del suelo; con un área menor a 4 km², cumpliendo con la función del análisis del ciclo hidrológico (Anónimo, s/f). La cuenca Chapala presenta alrededor de 95 cuencas experimentales, con el fin de ayudar a futuras investigaciones dentro del área.

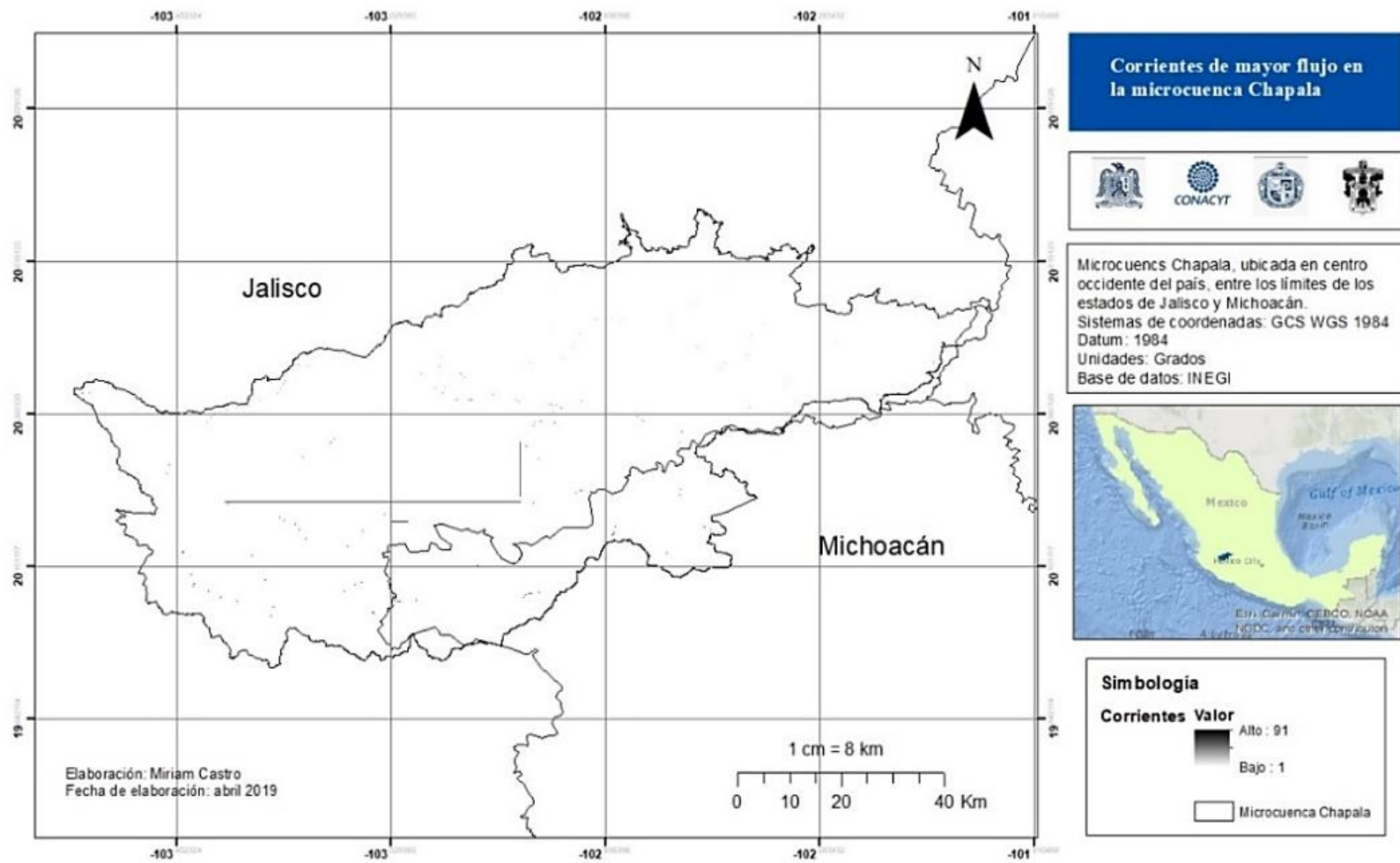


Figura 22. Corrientes de flujo dentro de la subcuenca Chapala.

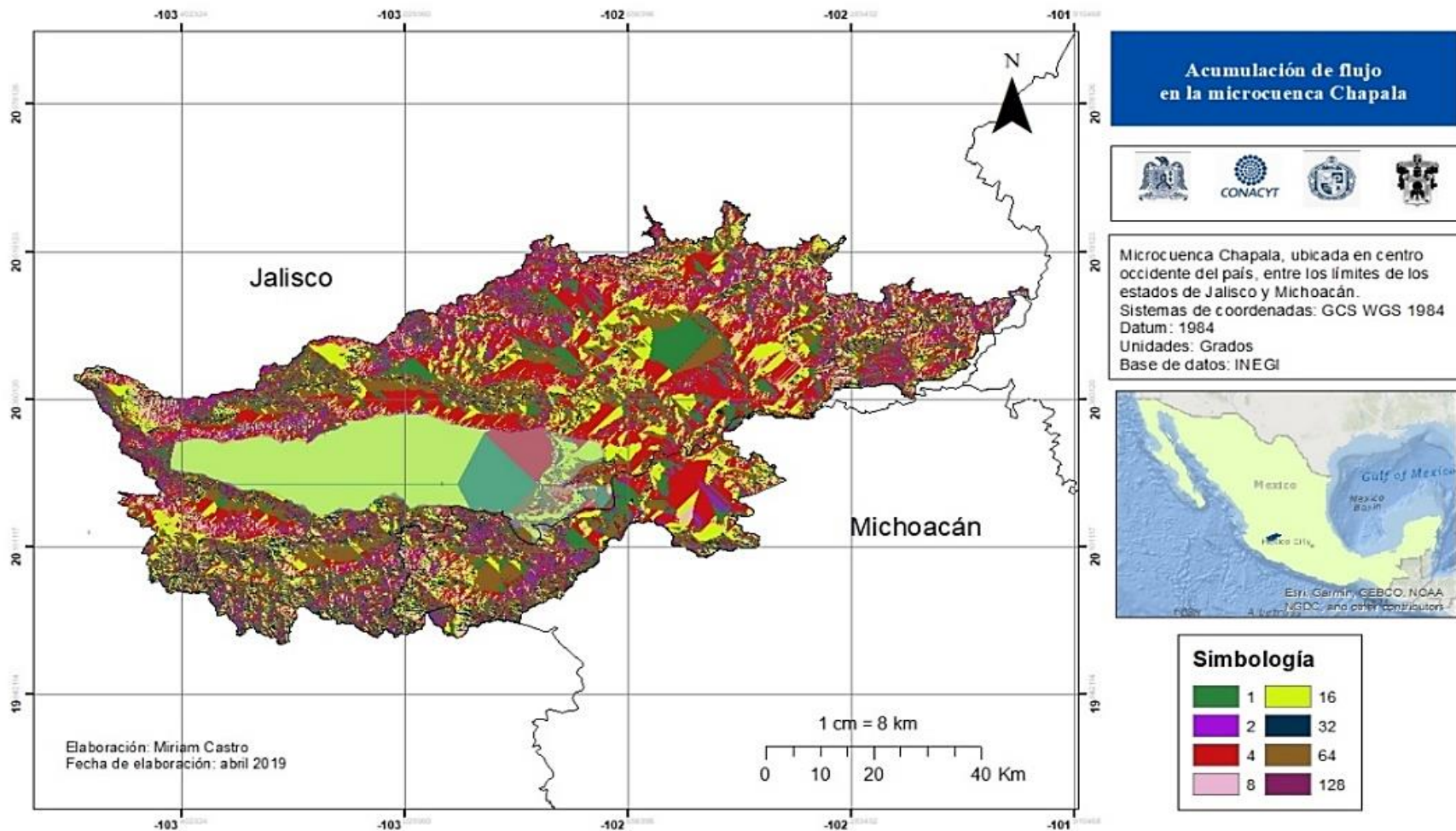


Figura 23. Acumulación de flujo en la subcuenca Chapala.

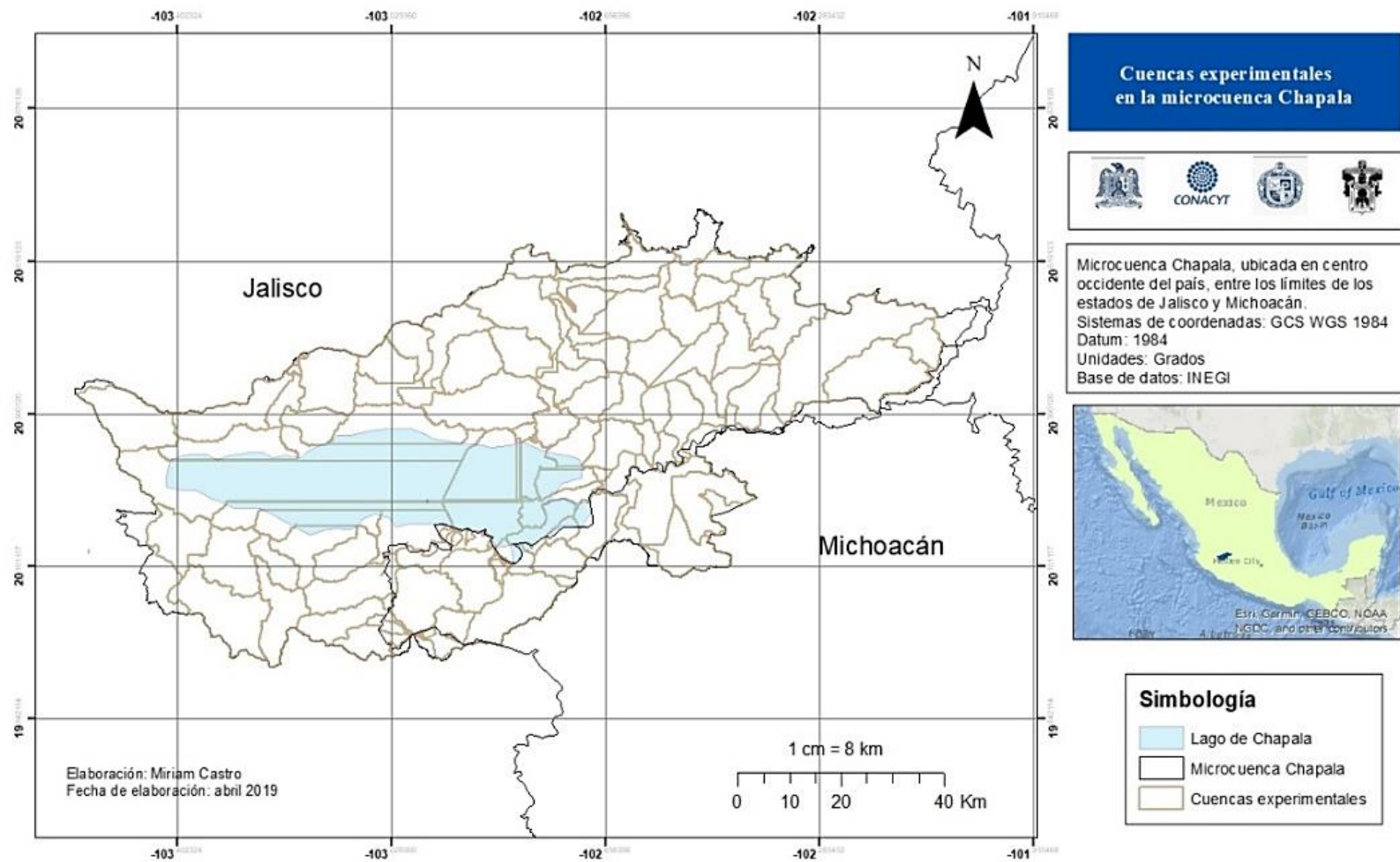


Figura 24. Cuencas experimentales dentro de la subcuenca Chapala (2019).

Conclusión

De acuerdo con el análisis expuesto, y de igual forma, a la búsqueda bibliográfica de investigaciones precedentes en la cuenca Chapala, se ayudó a la identificación de problemáticas, así como, al análisis del comportamiento de las variables climáticas e hidrológicas. Se reafirmo que el río Lerma es la principal fuente de abastecimiento del lago de Chapala, con un caudal máximo aproximado de $3\ 217.86\ \text{m}^3/\text{s}$, y que al mismo tiempo, se ha visto implicado en problemas de contaminación y disminución del caudal, y como consecuencia ha generado una disminución del cuerpo de agua; como bien se ha mencionado al inicio de este capítulo, la corriente de agua comienza en el Estado de México y como consecuencia a las demandas del territorio, surge una elevada extracción hídrica del cauce, con motivo de satisfacer las demandas de la población y la industria, sin embargo, de manera análoga es donde se origina la contaminación de tipo residual, siguiendo por los estados de Guanajuato, y Querétaro, los cuales sufren de una crisis por sus características climáticas, donde se presentan precipitaciones alrededor de $500\ \text{mm}/\text{anuales}$, a dicha situación se agrega el desarrollo económico promovido en la región, principalmente en el sector industrial, que para su funcionamiento necesitan de agua, la cual la región no dispone o presenta escasez, provocando la sobreexplotación de aguas subterráneas, y al mismo tiempo, convirtiéndose en una región con altos niveles de abatimiento; de la misma forma, se acentúan los problemas por contaminación en la región, producto de la mala gestión aplicada en los entidades federales. Finalmente, en la región baja de la cuenca, es decir, el estado de Michoacán que tienen como principal actividad la agricultura y que presentan condiciones climáticas más estables, con precipitaciones mayores a $700\ \text{mm}\ \text{anuales}$, se enfrentan a dificultades de contaminación debido al enriquecimiento de nutrientes presentes en las escorrentías por productos utilizados en el sector agrícola, causando según la investigación de Mendoza (1998) una alta presencia de fósforo en el lago, que han generado una situación de mala calidad del agua y de presencia de lirio acuático, además, la fuerte extracción de agua en el lago para el abastecimiento de la Zona Metropolitana de Guadalajara, de hasta 60% de la demanda total, ha originado un problema de balance hídrico en el cuerpo de agua.

Como consecuencia de la expansión económica proyectada en la región, se ha motivado a la destrucción de reguladores ambientales característicos del territorio, es decir, se han

incrementado las zonas de cultivo, ejemplo de ello es la zona de Jocotepec que ha incrementado el área destinada a berries. Finalmente, el desarrollo y uso de tecnologías de percepción remota han ayudado a una mejor comprensión de la problemática, donde, se puede observar de forma multitemporal la zona de interés, y que con una correcta integración de elementos se llega a una proyección más real de la problemática ambiental y/o del desarrollo económico mostrando los diferentes elementos económicos y sociales del territorio.

Capítulo 2. Análisis de la variabilidad climática y determinación de los factores externos que impactan en la degradación del Lago de Chapala a través de los años

Determinación de variables relacionadas a la variabilidad climática

El sistema climático ha cambiado a través los años, es un hecho comprobado por medio de la temperatura promedio mundial del aire y del océano, ocasionando el deshielo y el aumento medio del nivel del mar (IPCC, 2007). A través del tiempo se han alterado los ciclos hidrológicos de la Tierra, sin embargo, fue el año 2010 el segundo periodo con mayor registro de humedad desde 1941, dado que la precipitación anual fue de 935.5 mm comparado con su valor normal de 777.9 mm; cabe señalar que este fenómeno tuvo como principal factor el evento del Niño impactando al norte, noreste, sur y las regiones centrales de México. En la actualidad, la presencia de diferentes fenómenos que afectan a la climatología de una región ha ido en aumento, provocando modificaciones en los ciclos naturales de la Tierra (Davydova y Romero, 2011).

Determinación de variables de la hidrología del lago y otros elementos externos

La desecación de cuerpos de agua pronosticada por efecto de alteraciones climáticas es de las mayores amenazas en el listado de riesgos (Silwal, 2010). Los cuerpos de agua han sufrido a lo largo de los años el incremento de la presión sobre el recurso, afectando su disponibilidad, los elementos de presión son la sobreexplotación de acuíferos, cambio de uso de suelo, contaminación de cuerpos de agua, entre otros (Ordoñez, 2011).

A partir del registro de almacenamiento del lago de Chapala se ha podido evidenciar a través del tiempo las modificaciones en su superficie, considerando los años 2000 a 2003, el período más crítico registrado desde 1986, de acuerdo con los datos obtenidos por CONAGUA existe una variación generalmente negativa, es decir, existe una pérdida de millones de metros cúbicos al año, como se muestra en la figura 25.

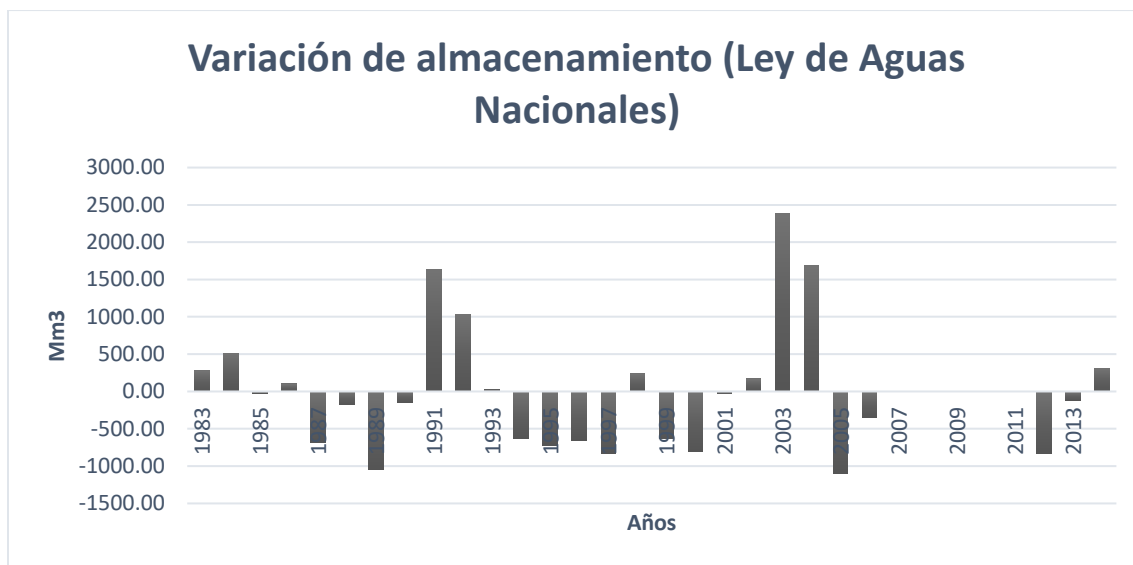


Figura 25. Promedio de almacenamiento anual del lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).

Los años con mejor registro del caudal de entrada al lago es en 2003 y 1991, sin embargo, existen datos con poco o nula entrada como 1987, 1994, 2000 y 2005. Así mismo, se tienen los datos de la precipitación que ha ayudado al volumen del cuerpo de agua, de forma descendiente se determina: 1992, 1996, 2004 y 1985. Estos dos factores son importantes para tener un resultado positivo o negativo del volumen de agua, debido a que se determinan como principales alimentadores del cuerpo celeste (figura 26).

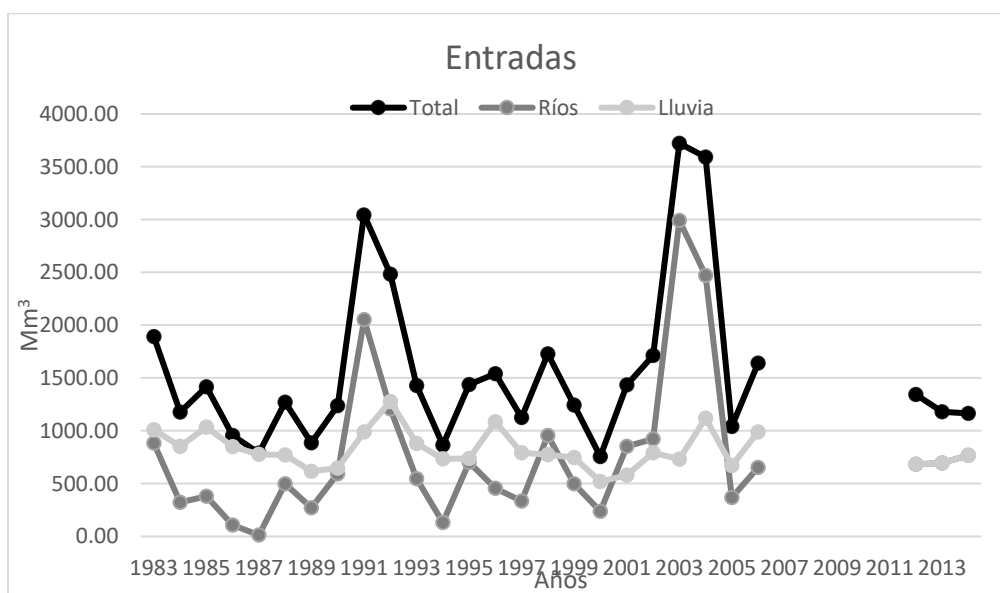


Figura 26. Entrada de agua por medio de río en el lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).

La mayor pérdida de volumen del lago se da por la evapotranspiración de este, los años de 1986, 1995 y 2005 tienen el registro como los más críticos, no obstante, hay datos de menor magnitud, organizados de forma decreciente; 1990, 1991, 1989, 2002 y 2003. Referente a las tomas de agua se ha mantenido generalmente estable en los años de 1986 a 2006 (figura 27).

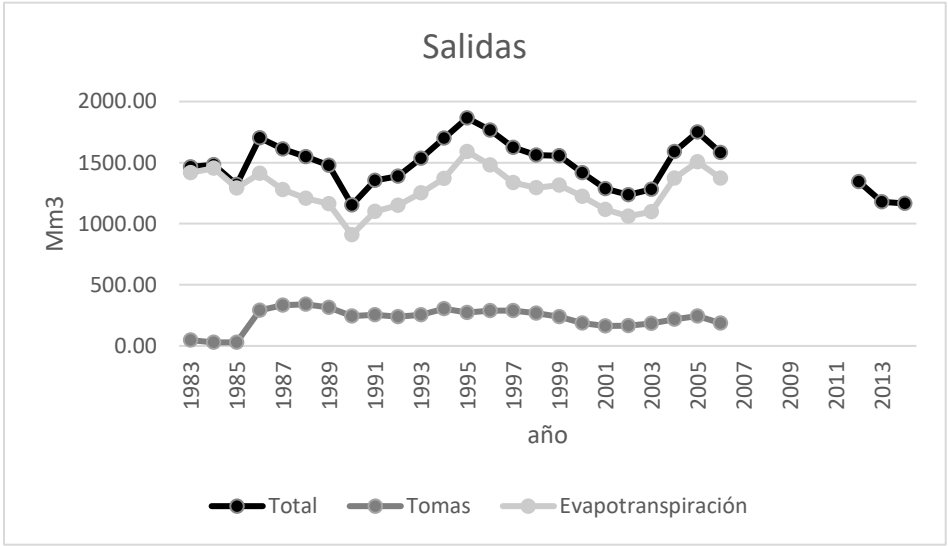


Figura 27. Salidas de agua en el lago de Chapala. Obtenido de CONAGUA (2018).

De acuerdo al inventario de presas realizado por CONAGUA y CFE (2013) existen en total 521 obras hidráulicas registradas en la zona Lerma Chapala, no obstante, es importante señalar que el uso que se le dé al agua en las zonas más altas influye en la cantidad del recurso que le llega al lago por medio del río Lerma que cruza toda la región, acorde al trabajo citado en el Estado de México existen 259 de las cuales 141 (54.4%) están dentro de la cuenca, en Guanajuato tiene en total 284, sin embargo, 201 se encuentran dentro de la región de estudio (70.77%), Michoacán cuenta con 277 y son 141 presas (50.90%) las que se ubican en la región, finalmente, a pesar de que Jalisco es el estado con más obras hidráulicas con 384, solo 38 (9.89%) están dentro, este comportamiento se da debido a que la zona de influencia tiene una menor proporción en la cuenca (figura 28).

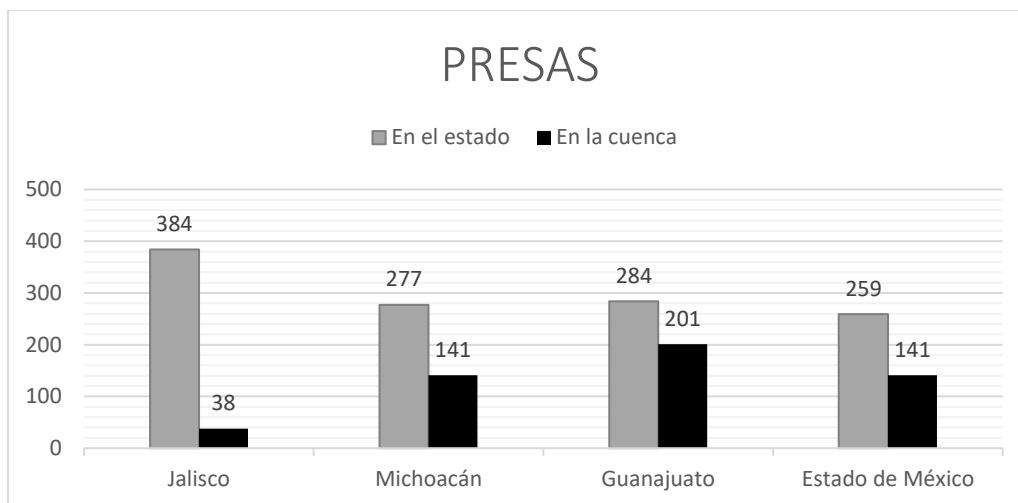


Figura 28. Presas con influencia en los niveles del lago de Chapala. Obtenido de Arreguin-Cortés (2013).

Tecnologías para medir y evaluar el fenómeno de la variabilidad climática

El uso de diferentes tecnologías para la medición del fenómeno de variación climática en la actualidad ha cobrado mayor relevancia por los resultados que se pueden obtener de ellos, así como, las aplicaciones en planes estratégicos de mitigación. Una de las herramientas creadas para la identificación de la variabilidad climática es el software R-ClimDex que analiza los datos climáticos históricos de las bases de datos, por medio de una representación gráfica, donde analiza 27 índices, de manera que el software fue utilizado por primera vez en Sudáfrica en 2004 y ha seguido hasta la actualidad. De manera complementaria, es relevante el uso de RHtestV4 para la homogenización de la información, donde se examina de forma detallada la información e indica los datos sospechosos (Zhang, 2013).

Parámetros de las plataformas (R-ClimDex y RHTest)

Los parámetros por analizar son:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Precipitación

El uso de las variables es en función a la información histórica disponible del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se considera que cuentan con una mayor confiabilidad, representatividad y continuidad a los encontrados en otras fuentes.

Procedimientos a considera de (R-ClimDex y RHtest)

El análisis de modificaciones en patrones climáticos se realiza por medio de RHtest y R-ClimDex en conjunto, para el análisis del comportamiento de las variables de cada una de las estaciones seleccionadas, la homogenización de la información y la elaboración de gráficos de los índices de cambio climático. El software tiene especificaciones para el cálculo necesario, 1) toda la información debe contar con los días consecutivos, 2) no debe haber datos vacíos y 3) la cantidad de información debe ser sustancial; si faltase alguna de estas especificaciones el programa no puede hacer ningún tipo de análisis.

Se analizó el comportamiento de las tres variables, en donde se observaron los cambios intraanuales e interanuales⁷ de cada una de las estaciones, se evaluó la calidad de la información de cada una para finalmente quedarse con 18 de ellas, con ciclos bien definidos (11078, 15029, 15063, 15086, 15104, 15251, 15308, 11033, 11052, 11072, 11142, 11146, 14002, 14016, 14072, 14156, 14168 y 14379).

Las alteraciones en el clima no son nuevas, a través del tiempo se han visto modificaciones en el sistema climático⁸, únicamente se puede hablar de *anomalía climática* frente las conceptualizaciones dominantes del clima, en la actualidad, el significado se ha complementado a ser un causante incontrolable de impactos negativos a la sociedad, independizándolo de las instancias gubernamentales (Marín, 1990). La fórmula de la anomalía se define como:

$$Anom = \frac{\textit{Promedio del período posterior} - \textit{promedio del periodo}}{\textit{Promedio del período posterior}} * 100$$

⁷ Diferencia entre diferentes años

⁸ Conjunto de propiedades y procesos responsables del clima.

A continuación, se muestran los mapas de anomalías climáticas (precipitación, temperatura máxima y mínima) dentro de la cuenca Lerma Chapala por periodos de 30 años (1961-1990, 1971-2000, 1981 – 2010 y 1991 – 2016). En el primer mapa del periodo 1961 – 1990, se muestra la zona alta con una baja anomalía, sin embargo, en la región media se encuentra una mayor presencia de cambios, es decir, Michoacán es el estado más afectado en el periodo, y a su vez, en la zona baja tiene un nivel con anomalía regular, no obstante, en la zona de Ocotlán muestra un valor sospechoso, debido a que para considerarlo fiable es necesario que tenga un cambio gradual alrededor de la estación (véase figura 29).

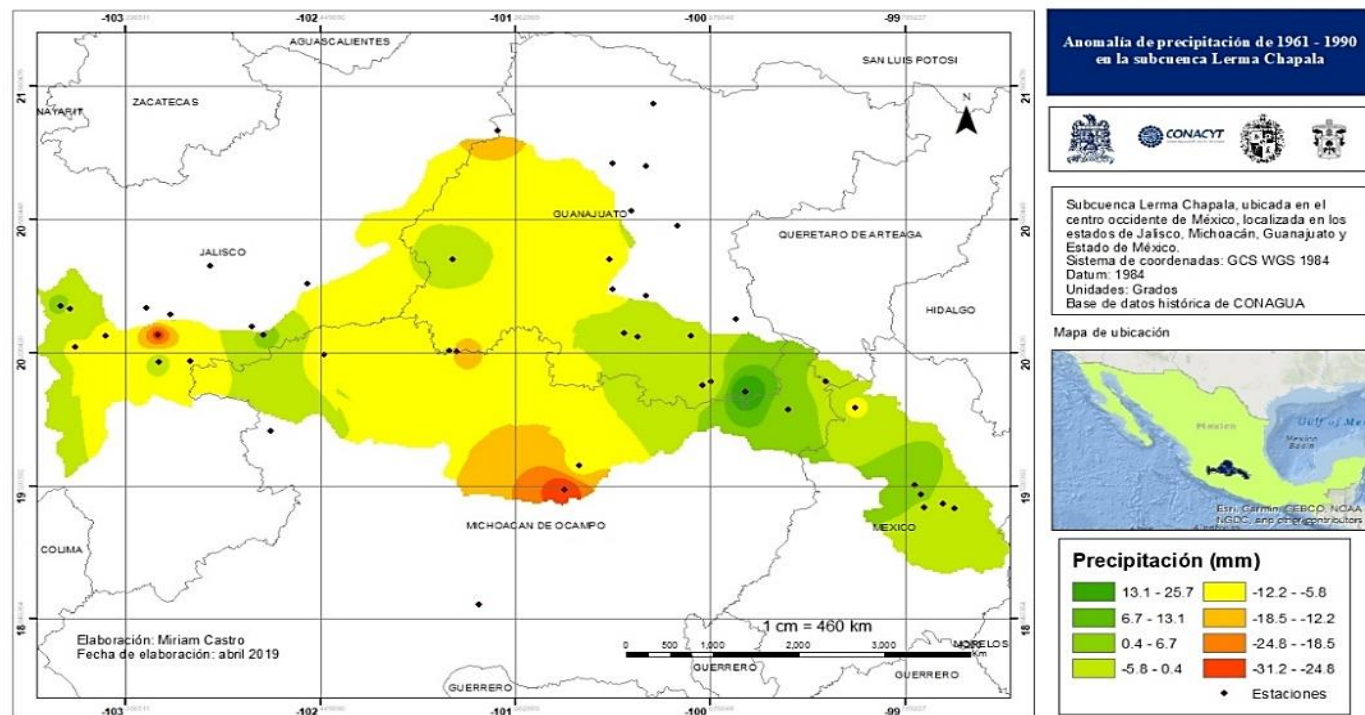


Figura 29. Anomalías de la precipitación en el periodo 1961 - 1990 en la cuenca Lerma Chapala.

En el periodo de 1971 a 2000, se puede visualizar una mayor presencia anómala, la cual, se ubica entre la región alta y media, es decir, tiene una disminución importante de lluvias de hasta -36.6, sin embargo, la región media y baja muestran oscilaciones menores (figura 30).

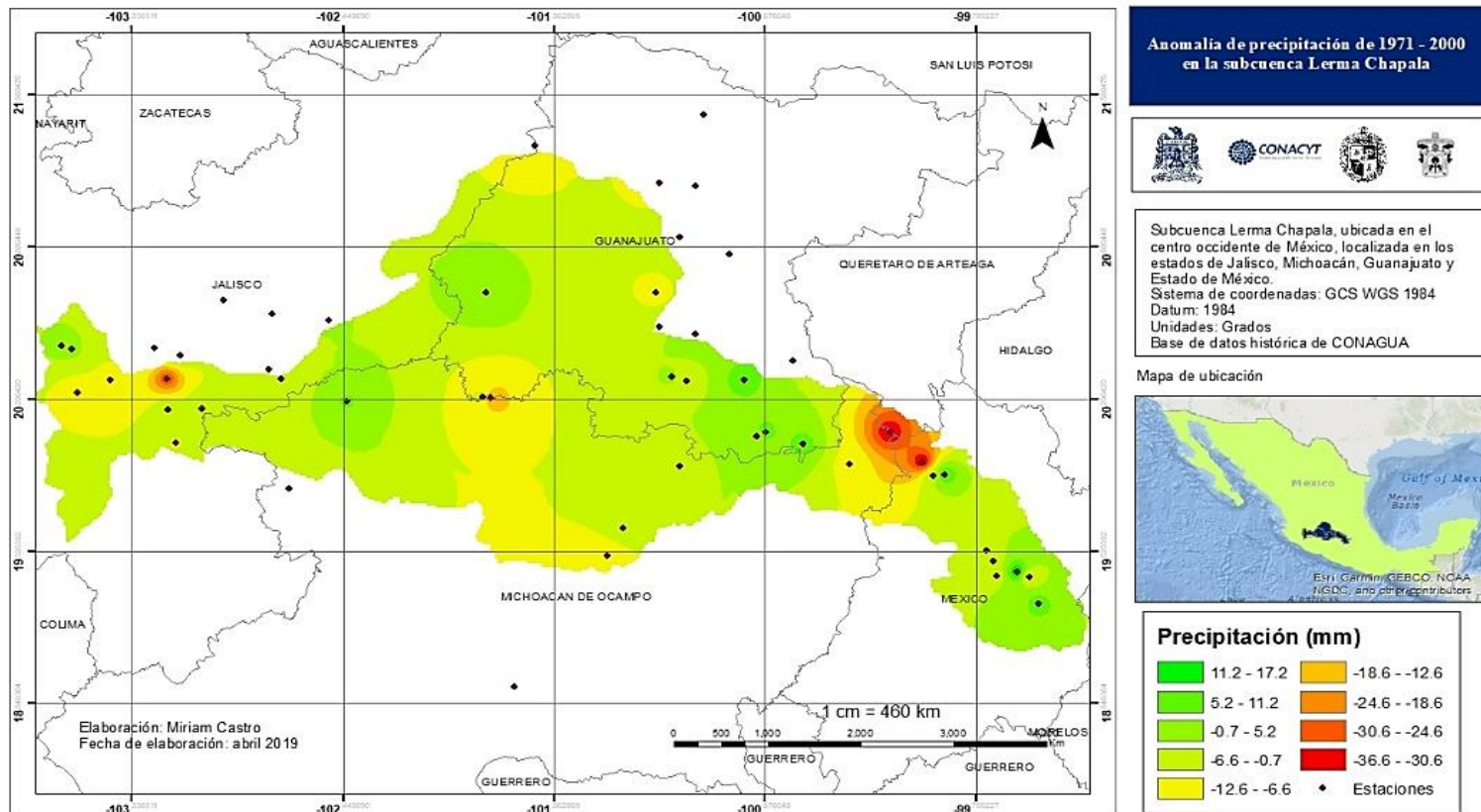


Figura 30. Anomalía de la precipitación en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.

De acuerdo con la precipitación de 1981 a 2010, se tiene cambios de forma gradual en Michoacán y los límites con Querétaro, se considera una reducción sustancial en la precipitación, de igual forma, la cuenca tiene una reducción de lluvia media (figura 31).

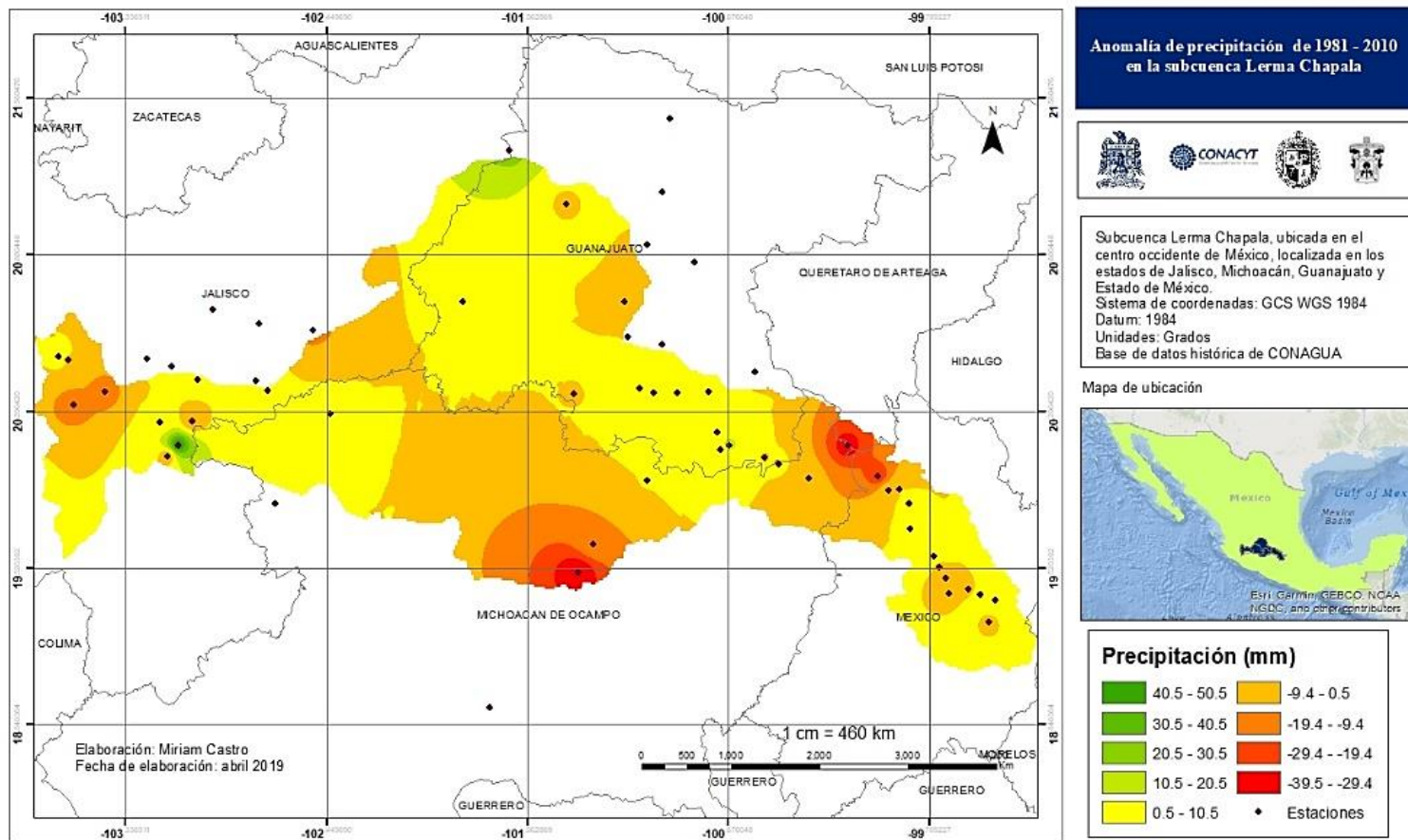


Figura 31. Anomalía en precipitación en el periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.

En el periodo de 1990 a 2016, se observa la disminución de precipitación, principalmente se da con una magnitud mayor en la cuenca alta y baja de la cuenca, sin embargo, en las diferentes regiones muestra un comportamiento de decrecimiento regular (figura 32).

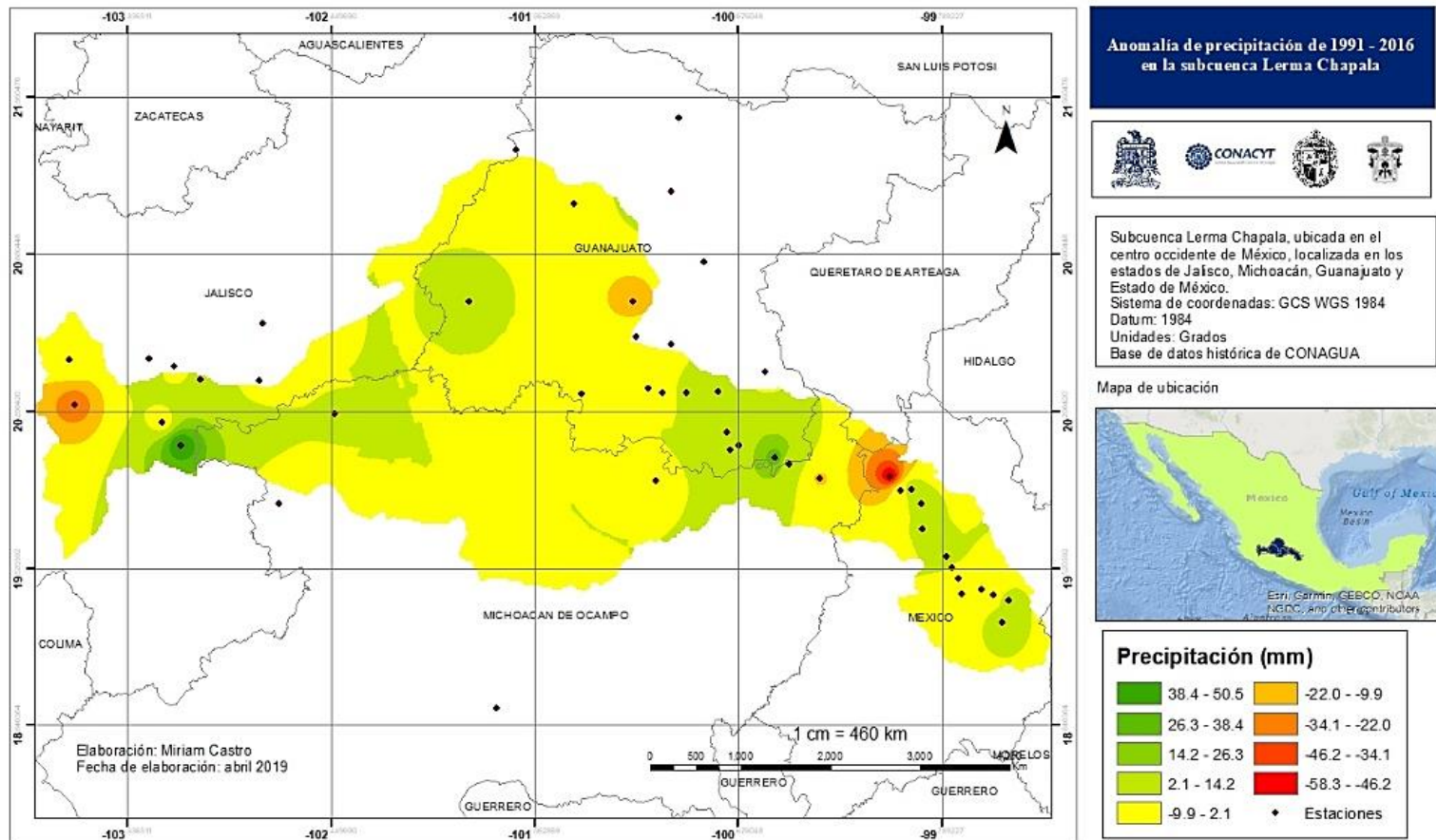


Figura 32. Anomalia de la precipitación en el periodo de 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala

La figura 33, presenta una anomalía alta en la región alta, así como, pequeñas zonas entre el estado de Michoacán y Guanajuato, no obstante, en la zona centro y baja existe una disminución de la temperatura.

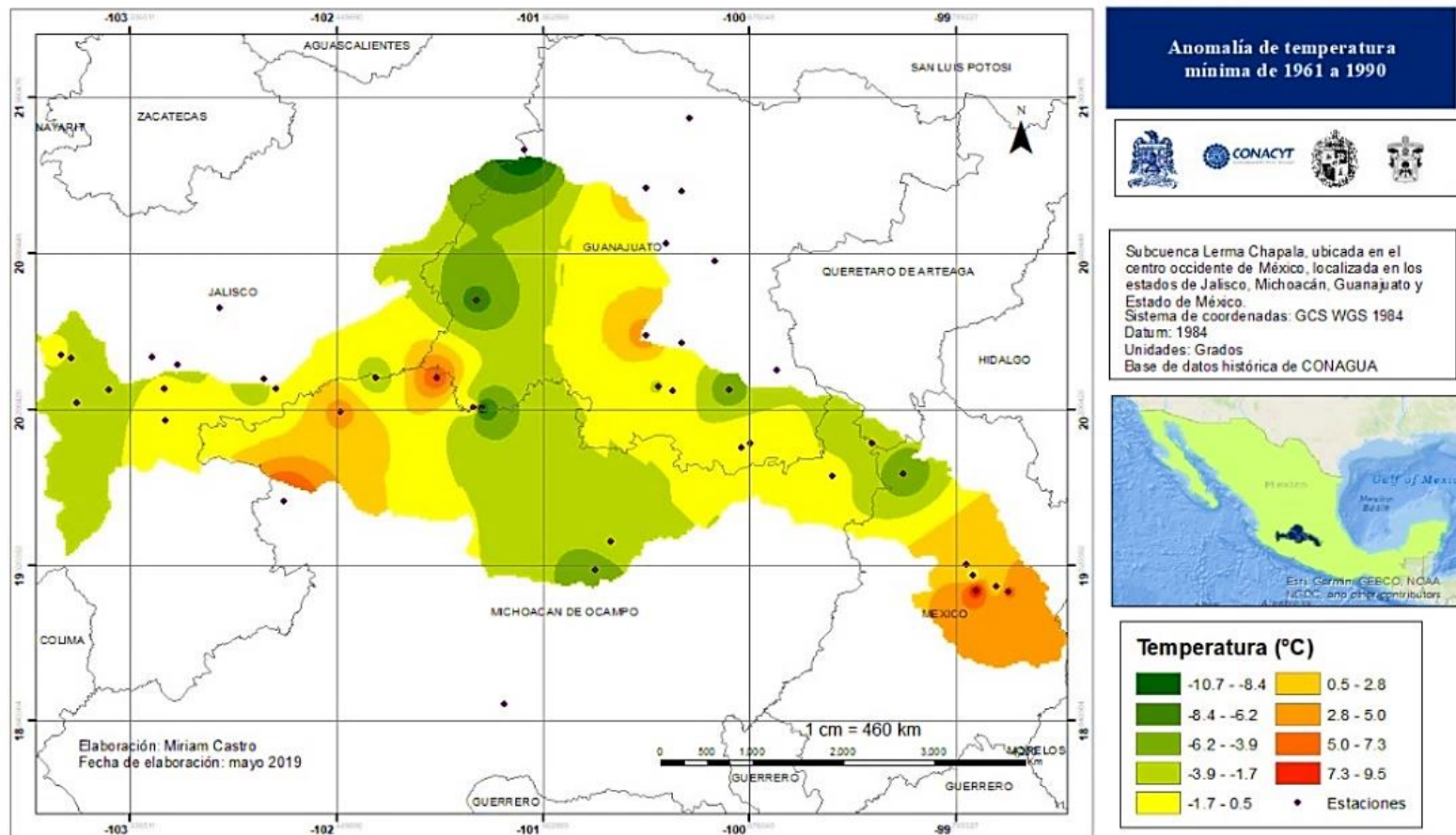


Figura 33. Anomalía de la temperatura mínima en el periodo 1961 a 1990 en la cuenca Lerma Chapala.

La figura 34 muestra de forma general un comportamiento de disminución de temperatura mínima, solo la zona alta es la región con un comportamiento creciente de temperaturas (figura 34).

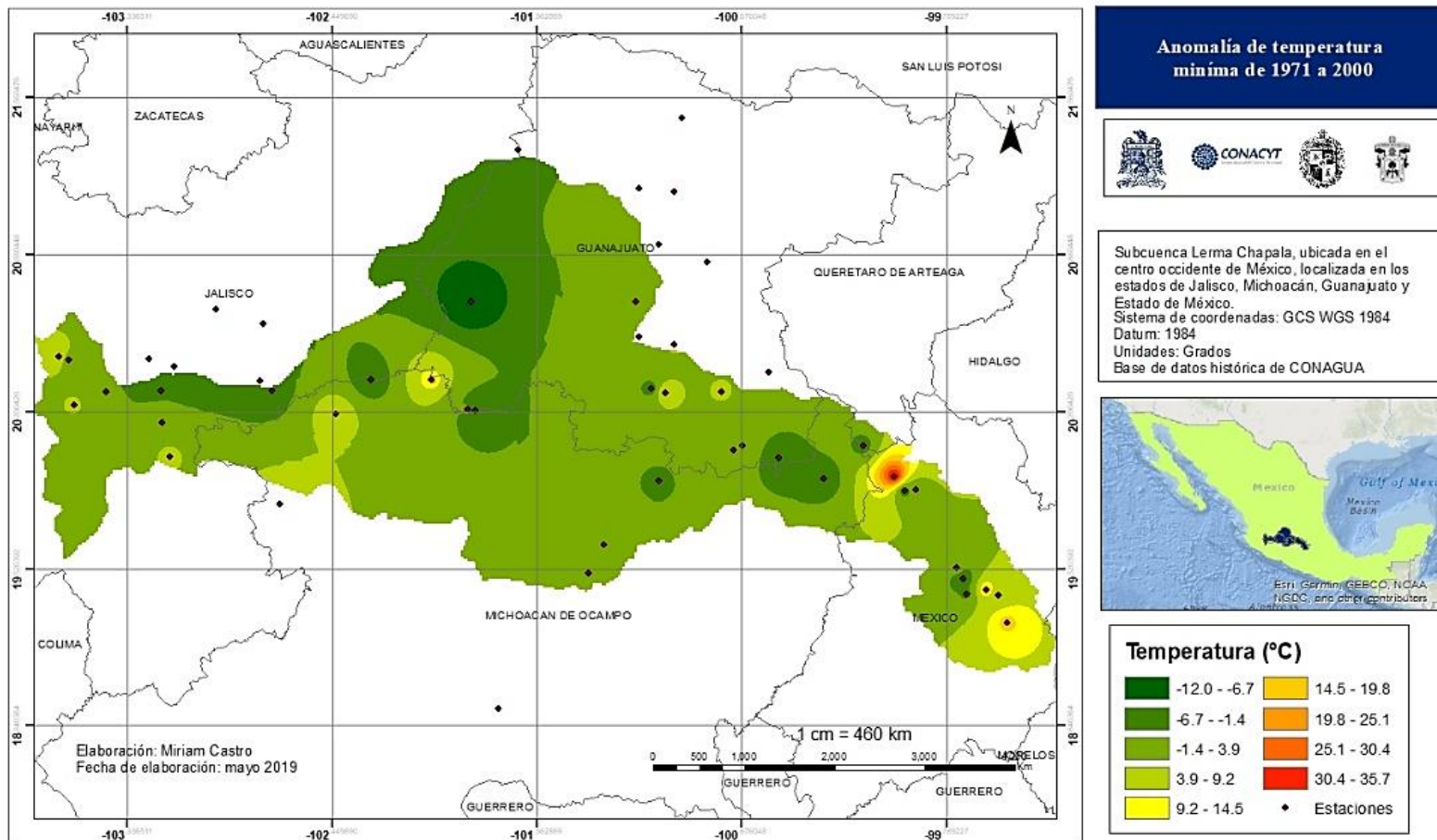


Figura 34. Anomalia de la temperatura mínima en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.

En la figura 35, se puede observar un aumento de la temperatura, se ubica principalmente en el límite, entre Michoacán y Jalisco, y de igual manera, en la región alta presenta anomalías altas, sin embargo, de forma general, la cuenca media y baja tienen una disminución de la temperatura mínima similar.

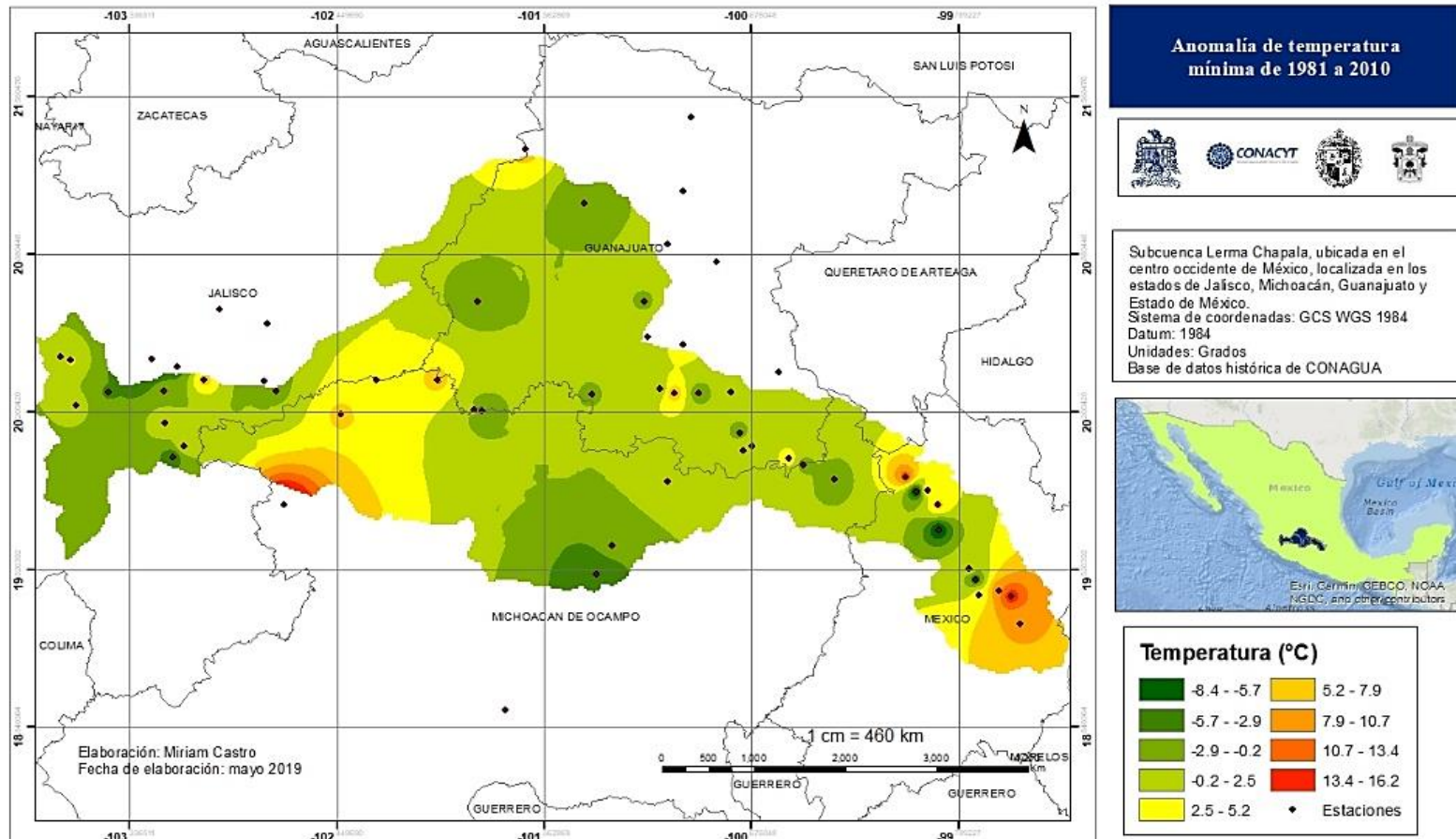


Figura 35. Anomalia de la temperatura mínima del periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.

En la figura 36, existe una disminución generalizada de la temperatura mínima, no obstante, en la región alta y en diferentes puntos en el oeste de la región media se encuentra un incremento importante de la misma.

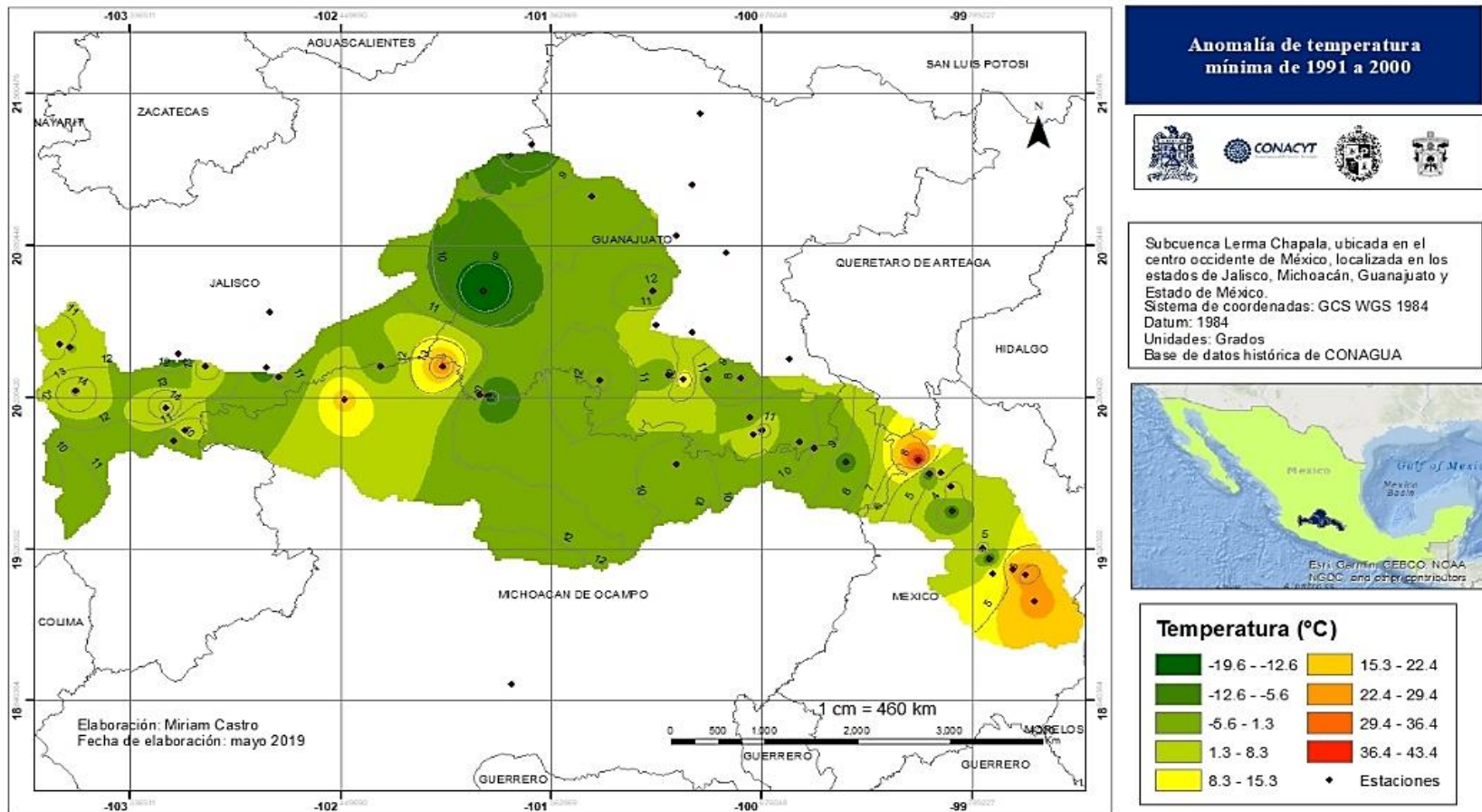


Figura 36. Anomalia de la temperatura mínima en el periodo 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala.

La figura 37, presenta una menor variación en la región media y baja, sin embargo, en la transición entre las tres diferentes regiones muestra una anomalía mayor, cabe señalar que al norte de Guanajuato se puntualiza un incremento alto entre periodos

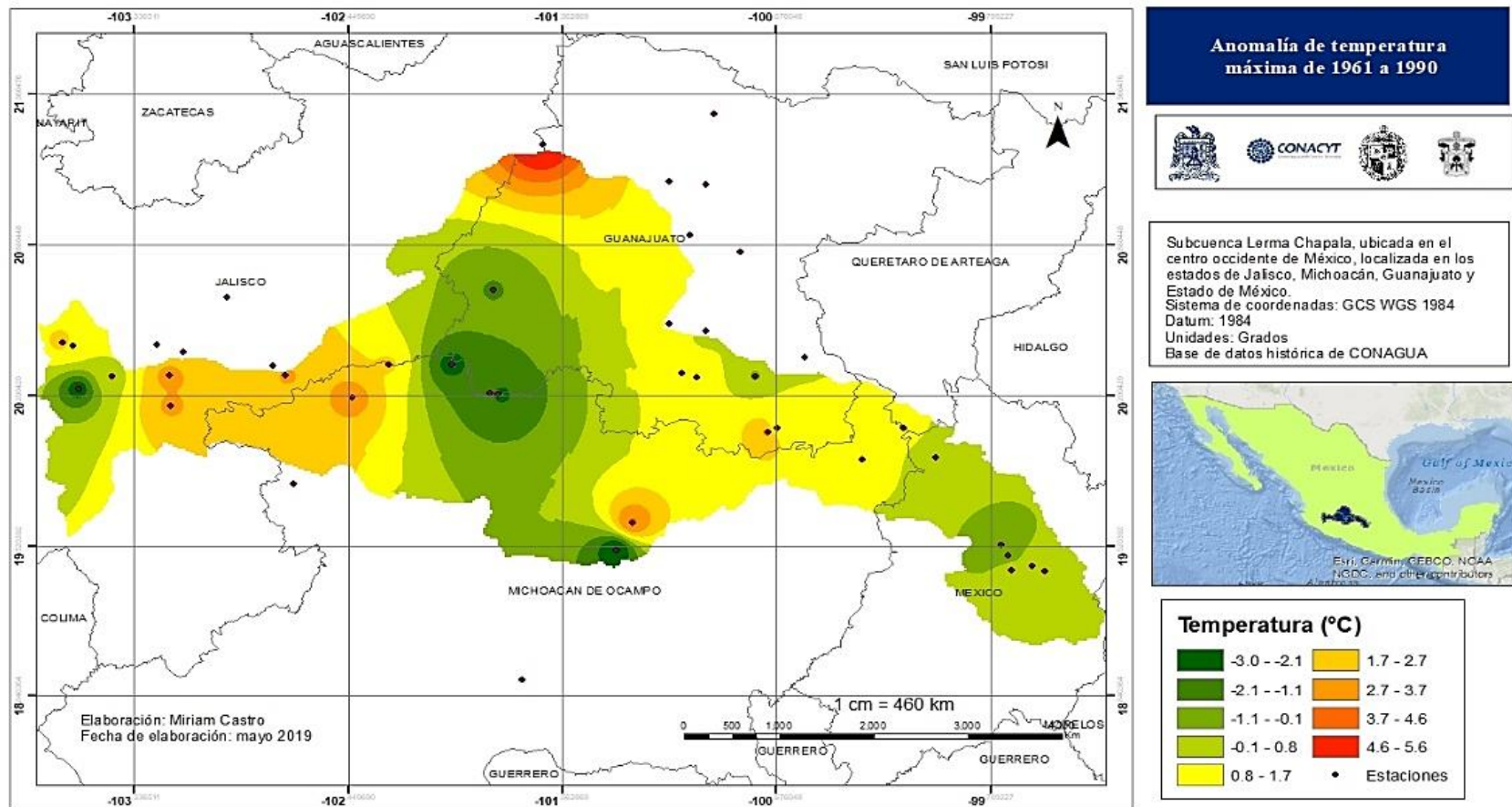


Figura 37. Anomalías en temperatura máxima en el periodo 1961 - 1990 en la cuenca Lerma Chapala.

En la figura 38, se puede observar un mayor incremento de la temperatura, el cual, se da en Michoacán y en Jalisco, sin embargo, en Guanajuato y Michoacán presenta una menor anomalía, y finalmente, la región alta y media cuenta con una anomalía similar intermedia.

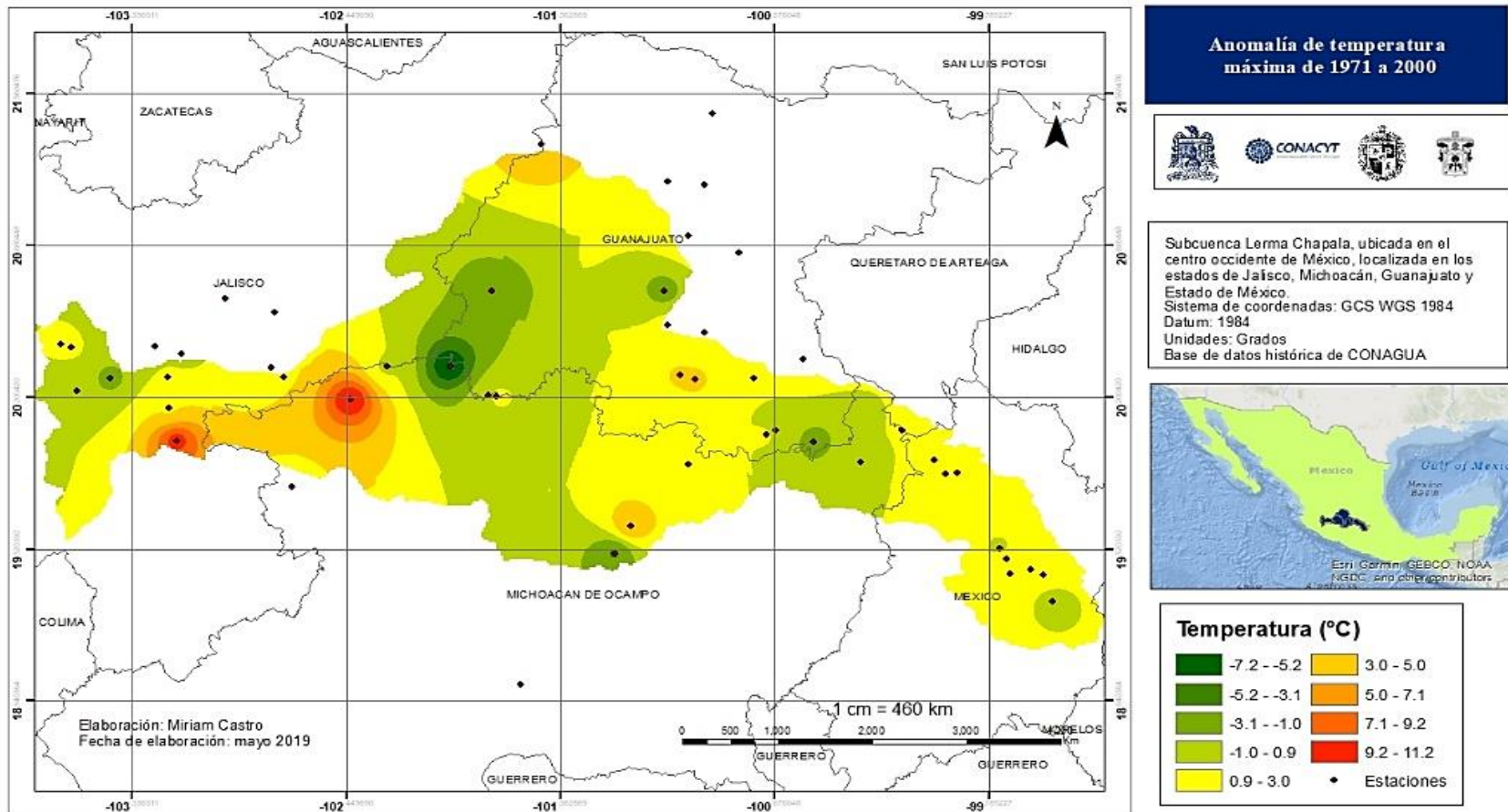


Figura 38. Anomalia de la temperatura máxima en el periodo 1971 a 2000 en la cuenca Lerma Chapala.

De acuerdo con la figura 39, se observa un incremento importante de la temperatura en Michoacán, y a su vez, en el resto de la región media se tiene una disminución de la temperatura mínima, sin embargo, en la zona alta y baja se comportan de forma similar, es decir, de forma ascendente.

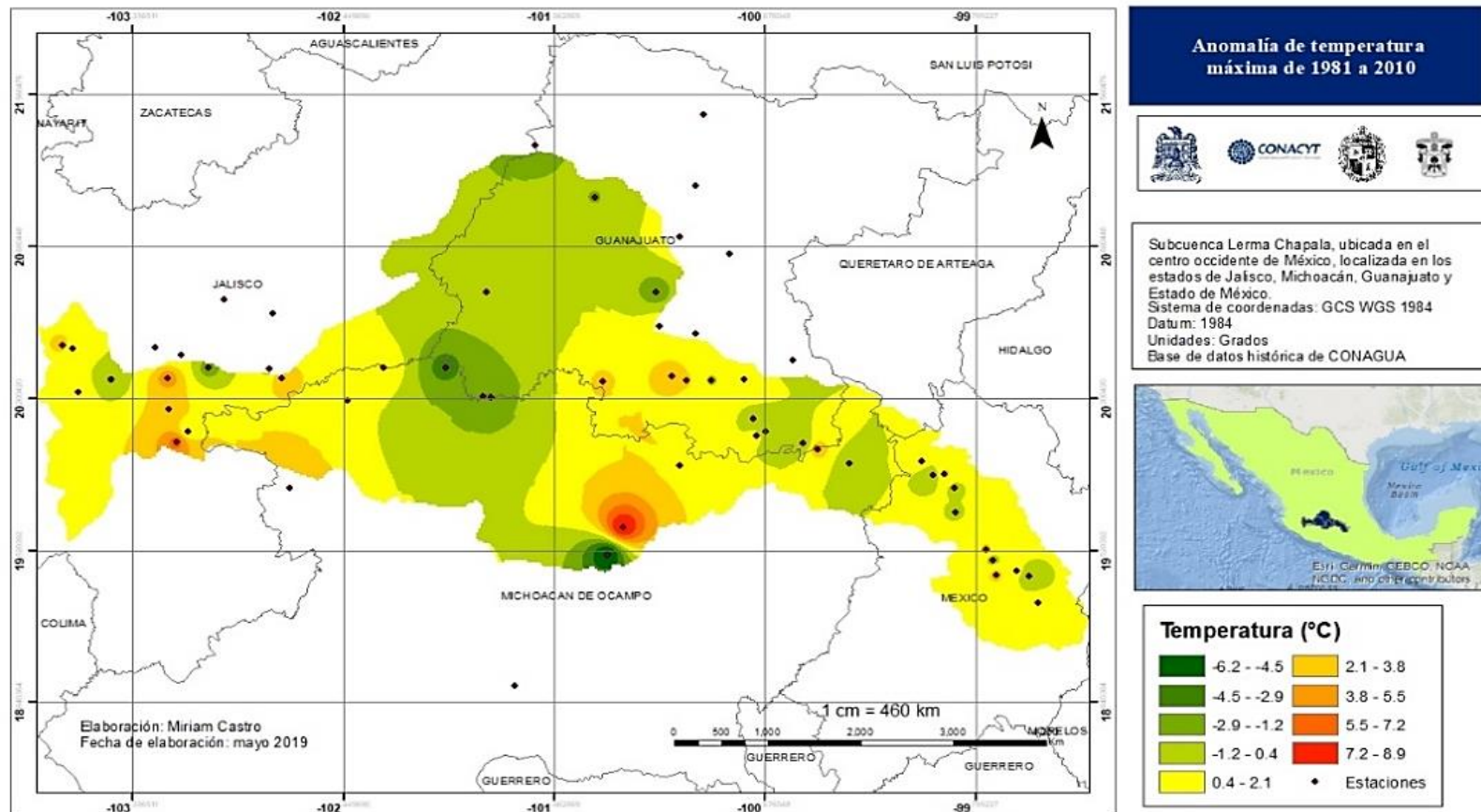


Figura 39. Anomalia de la temperatura máxima en el periodo 1981 a 2010 en la cuenca Lerma Chapala.

En la figura 40, se puede visualizar que el incremento se acentúa entre la región media y baja, no obstante, la región media se divide en dos, es decir que, debido a los pocos puntos de información en esa zona, consecuencia de las estaciones removidas que contaban con valores sospechosos, se tuvo un error en la interpolación, sin embargo, de forma general se puede decir que hay presencia de una disminución de la temperatura.

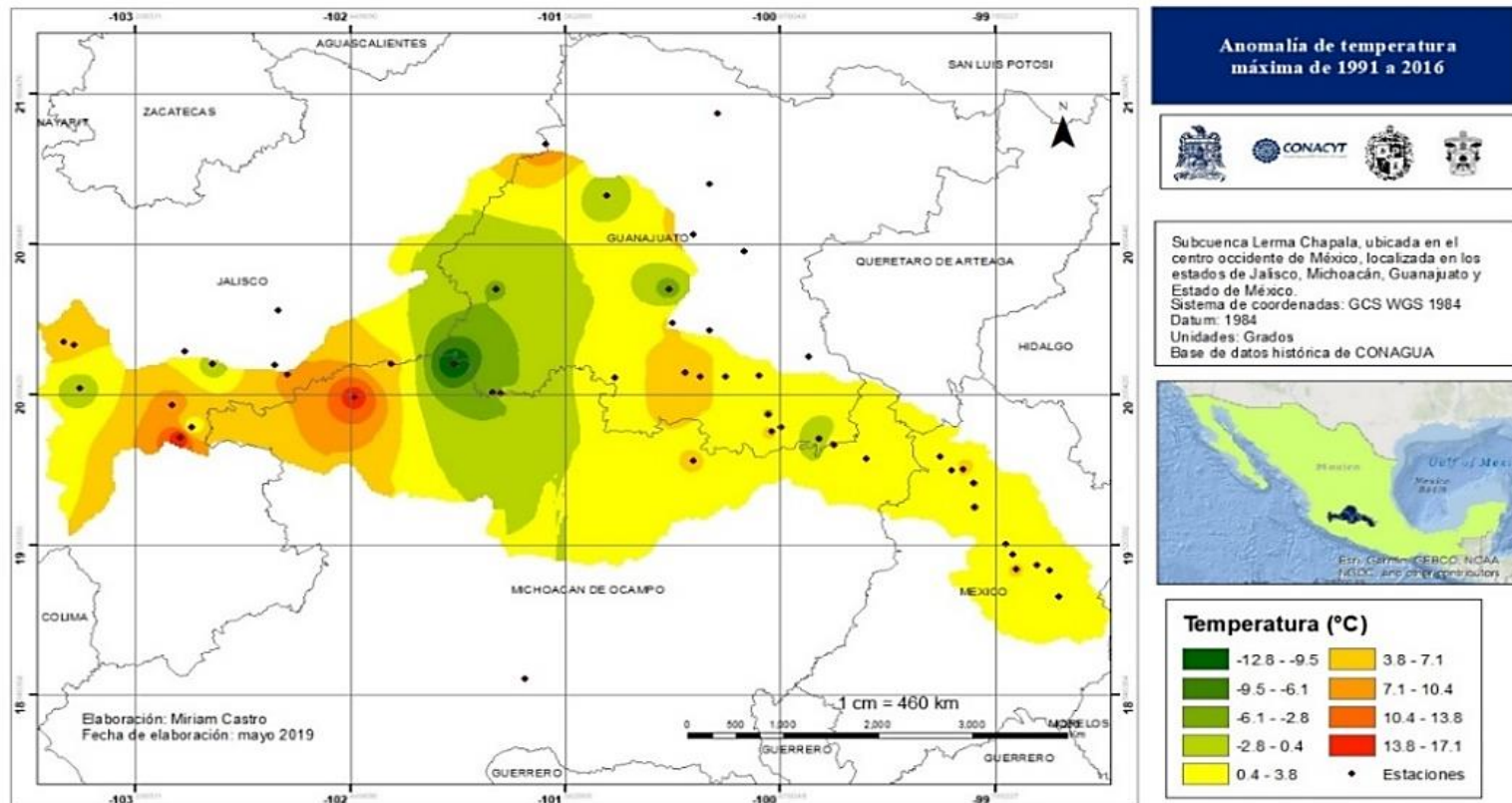


Figura 40. Anomalia de la temperatura máxima en el periodo 1991 a 2016 en la cuenca Lerma Chapala.

De acuerdo con la figura 41, la cual, se clasifica por periodos representativos, y que cuenta con un cálculo de acuerdo a la media móvil se visualiza el incremento que se ha dado a través del tiempo, con un crecimiento de 0.7°C desde 1961.

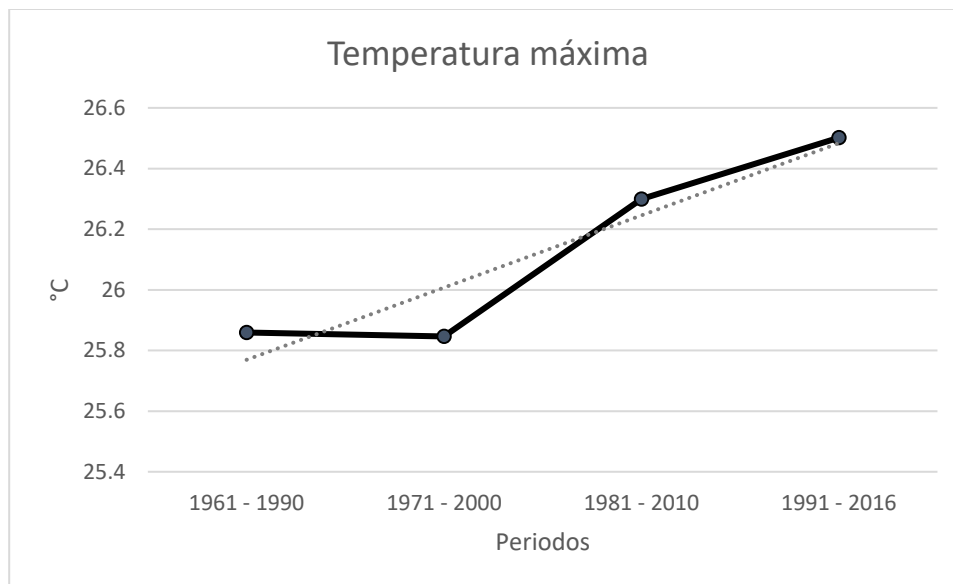


Figura 41. Comportamiento de la temperatura máxima en los diferentes periodos representativos.

En la figura 42 se dimensiona el cambio de la temperatura mínima, la cual, se ha comportado de forma decreciente a través de los periodos, y que, a su vez, origina ambientes más secos en la región Lerma Chapala, es decir, en el primer periodo calculado se tenía 9.8°C , sin embargo, ha ido disminuyendo hasta 9.6°C , o sea que los valores han descendido 0.2°C .

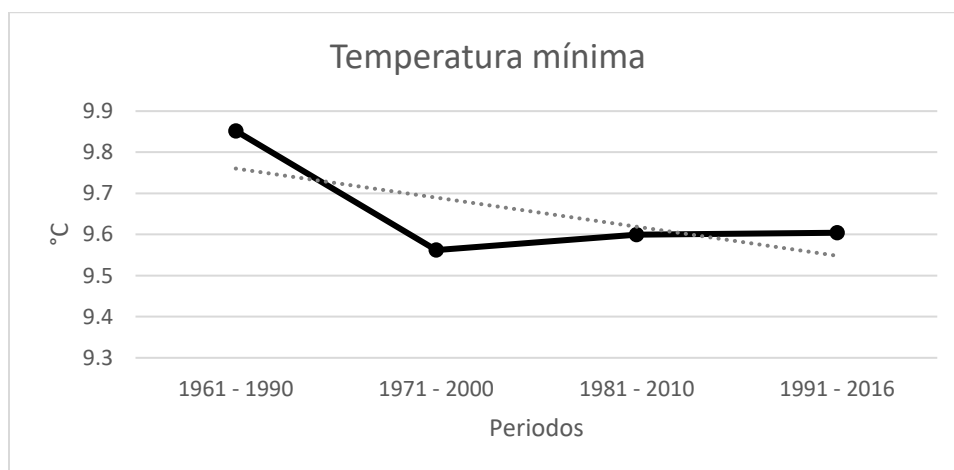


Figura 42. Comportamiento de la temperatura mínima en los diferentes periodos representativos.

En la figura 43 se observa el análisis de precipitación, la cual, ha tenido un comportamiento decreciente, es decir, cuenta con una reducción de la media acumulada de alrededor de 31 mm, de acuerdo con la tendencia se espera que la alteración de lluvia genere una mayor desecación en la región.

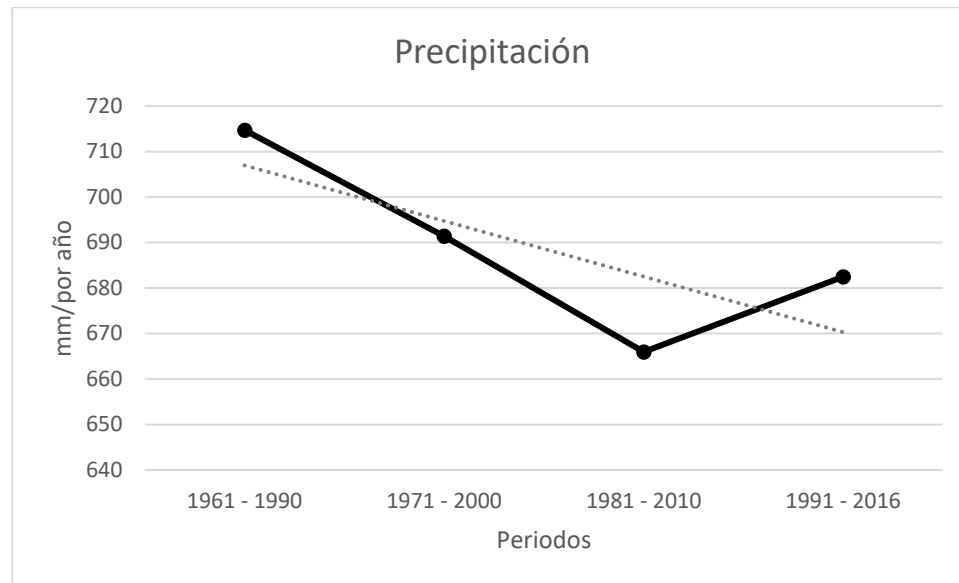


Figura 43. Comportamiento de la precipitación en los diferentes periodos representativos.

Uno de los principales propósitos de la generación de índices extremos de la variabilidad climática es el análisis y el monitoreo de modificaciones en el clima. No obstante, los datos deben ser previamente homogenizados por medio de RHtest, de acuerdo con Yan *et al.* (2014) las estaciones se someten a diferentes cambios (instrumentos, normativas, métodos) que provocan información sospechosa; para evitar caer en errores en el análisis es necesario aplicar la homogenización, que es la técnica para ajustar las bases de datos y obtener una observación más real y certera; Es decir, con el uso del paquete RHtest se seleccionó y verificó la información de las bases de datos, debido a que puntualiza los datos sospechosos dentro de ellas, el producto del antes y después de la homogenización muestra una modificación en los promedios y las tendencias (Zhang y Feng, 2004). No obstante, se encontró que algunos de los índices calculados en realidad no aportan ninguna información al respecto, por consecuente, se tomó la decisión de trabajar solo con 20 índices

de los 27 que analiza el paquete R. La siguiente tabla muestra los índices analizados y su significado.

Tabla 2. Índices analizados por medio de RCLimDex y sus significados.

ÍNDICE	NOMBRE DEL INDICADOR
TMAXmean	Promedio de temperatura máxima
TMINmean	Promedio de temperatura mínima
SU25	Días de verano
TXx	Valor mensual máximo de temperatura máxima
TNx	Valor mensual máximo de temperatura mínima
TXn	Valor mensual mínimo de temperatura máxima
TNn	Valor mensual mínimo de temperatura mínima
DTR	Rango diario de temperaturas
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en 1 día
RX5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días
SDII	Índice simple de intensidad diaria
R10mm	Número de días con precipitación regular
R20mm	Número de días con precipitación intensa
R25mm	Número de días con precipitación muy intensa
CDD	Días secos consecutivos
CWD	Días húmedos consecutivos
R95p	Días muy húmedos
R99p	Días extremadamente secos
PRCPTOT	Precipitación total anual

Una vez analizado los gráficos generados en RCLimDex, se recopiló la información del valor de la curva por cada una de las variables para su posterior integración en una matriz y el cálculo del promedio por cada una, dicho proceso se realizó por medio de Excel 365, posteriormente, se unificó y se creó gráficos, en donde se visualiza el comportamiento de las variables. En la figura 44 se observan los diferentes índices, de acuerdo con los resultados se obtuvieron 15 índices positivos, con diferente influencia, dicho de otra forma, las variables con un valor de la pendiente positiva fueron; la temperatura máxima con 0.015, los días de verano con 0.317, el valor máximo de la temperatura máxima tuvo un valor de 0.002, el valor mínimo de la temperatura mínima 0.024, el rango diario de las temperaturas con 0.023, la cantidad de lluvia máxima en un día con 0.165 y en cinco días con 0.320, el índice simple de intensidad diaria tuvo 0.022, la lluvia regular tuvo 0.028, la lluvia intensa 0.041 y la lluvia muy intensa con 0.036, sin embargo, cabe señalar que los índices más altos fueron los días secos consecutivos con 0.454, los días con mayor humedad 1.839, los días extremadamente secos con 1.095 y por último la precipitación total con 1.062. No obstante, se presentaron cuatro índices con tendencia decreciente, los cuales fueron la temperatura mínima con -0.008,

el valor máximo de la temperatura mínima con -0.025 el valor mínimo de la temperatura máxima con -0.003 y finalmente los días húmedos consecutivos con -0.019.

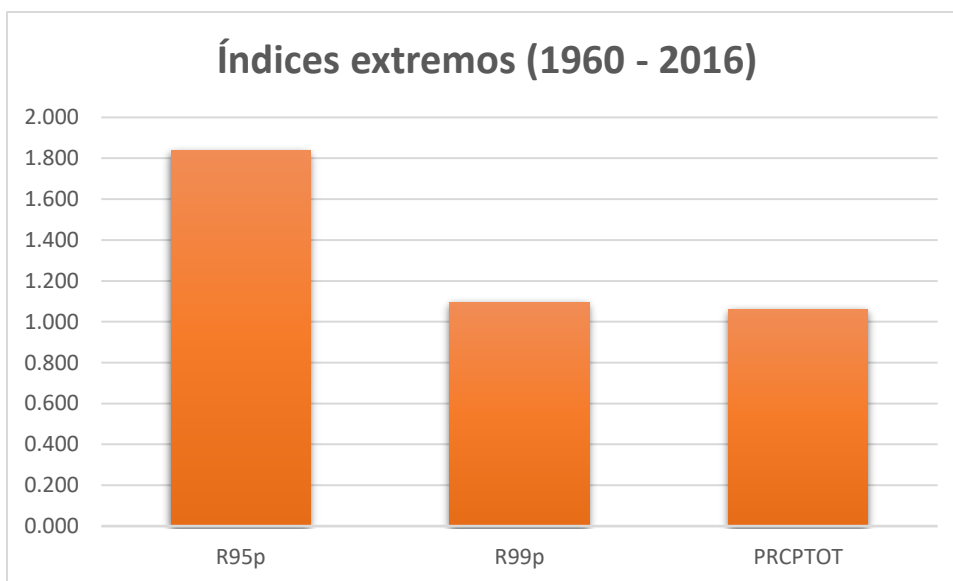
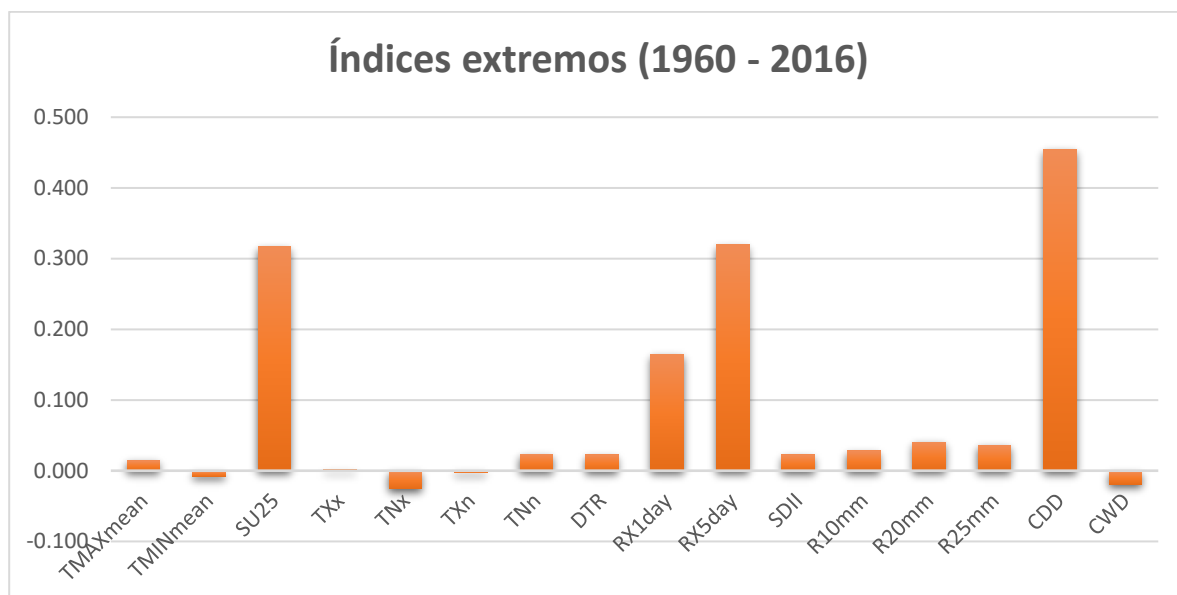


Figura 44. Comportamiento de los índices de cambio climático en la cuenca Lerma Chapala.

Conclusión

El uso y manejo de las bases de datos obtenidos del portal de CONAGUA es complicado, debido a la cantidad de errores encontrados en las bases que hicieron muy difícil la selección de estaciones, de la preselección de 60 estaciones escogidas inicialmente, dentro de la cuenca Lerma Chapala, se quedaron solamente 18, es decir, solo la tercera parte de la información tenía una mejor calidad de la información, de igual forma, el uso de la técnica de homogenización mejoró la selección de estaciones con información más fiable. Cabe señalar, que las condiciones que maneja CONAGUA en las estaciones climáticas se consideran las más completas, con información histórica, así como, con una mejor instalación para la recolección de datos.

El comportamiento de la lluvia de forma interanual e intraanual es muy similar, sin embargo, en algunas ocasiones se presentan contrastes dentro de la cuenca, es decir, las regiones tienen diferencias respecto a los valores máximos o mínimos de las variables, en la región alta se tiene una mayor acumulación de la precipitación respecto a las otras zonas; la zona media es la más seca y la que presenta mayores temperaturas. A través de los diversos periodos se han presentado diferentes condiciones climáticas, en cuanto a precipitación se puede observar un contraste de la cantidad de lluvia registrada; en el periodo comprendido del 1961 al 1990, en la región alta se observa mayoritariamente el rango 733 – 805 mm, en la zona media 661 – 733 mm y en la baja 733 – 805 mm; en la fase de 1971 – 2000, en la zona alta se ve un comportamiento más heterogéneo, con pequeños lugares con carencia de precipitación, en la media existe un recrudecimiento de las lluvias con pequeñas zonas de hasta 350 – 419 mm y en la baja se intensifica puntos con menor acumulación de lluvia; en el tiempo comprendido de 1981 – 2010 se observa una similar distribución del recurso hídrico, sin embargo, la cantidad de lluvia es menor, tiene en el rango máximo una diferencia entre 66 y 35 mm, no obstante, se observa en el rango mínimo un contraste menor de alrededor de 30 y 20 mm; y finalmente, en el ciclo de 1991 – 2016 se presenta una mayor cantidad de lluvia en la mayoría de la cuenca, a pesar de ello, en las zonas con menor lluvia se recrudeció más el comportamiento. Según el Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés (2007) pronóstica una disminución de las lluvias, con consecuente, se concluye que uno de los supuestos en la

variabilidad climática se cumple en la zona de estudio, viéndose reducida la cantidad de lluvia por periodo en la cuenca.

El comportamiento térmico interanual e intraanual muestra ciclos anuales, con periodos calientes y otros más fríos; de acuerdo a la descripción en el tiempo en la variable temperatura máxima se observa que entre 1961 – 1990 había presencia de anomalías positivas, es decir, se presentaban incrementos de temperatura en la zona norte de la cuenca dentro del estado de Michoacán y Jalisco, mientras que en la zona centro prevalecían condiciones de temperaturas con anomalías medias y bajas; en el periodo 1971 – 2000 disminuyó la anomalía en el norte de la cuenca, sin embargo, incrementó en la región sureste de la región baja y en los límites de Guanajuato y Jalisco; en el tiempo de 1981 a 2010 incrementa solo en la zona centro oriente, en el estado de Michoacán, en general prevalece la anomalía media y solo con una franja de disminución de la anomalía en la región media; la época de 1991 a 2016 predomina un comportamiento de la anomalía medio, con zonas que incrementa en la región baja de la cuenca, así como, existe una disminución en la zona media, entre Guanajuato y Michoacán. Los mapas marcan una clara tendencia positiva de las anomalías en la cuenca, predominando el ambiente seco del ambiente a través de los años. De acuerdo a los mapas de anomalías de la temperatura mínima la región alta presenta una anomalía positiva en el tiempo de 1961 a 1990, en general, la zona media presenta anomalías regulares y bajas, y solo en pequeñas zonas localizadas en los límites de Michoacán con Jalisco se muestra una anomalía alta, es decir, un incremento de temperaturas mínimas, para el periodo de 1971 a 2000 se acentúa de forma generalizada una anomalía baja en toda la zona de estudio, con puntos más cálidos en la zona alta de la cuenca; entre 1981 a 2010 disminuye la anomalía con el periodo anterior, solo con puntos más cálidos en la región alta y en la zona entre Jalisco y Michoacán; para 1991 a 2016 presenta una anomalía baja respecto a la otra en la mayoría de la cuenca, solo con puntos de crecimiento en la región alta, dentro del Estado de México. En general, ha existido un incremento de temperaturas máximas en cada periodo, y respecto a la temperatura mínima ha decrecido en el tiempo representativo, este comportamiento ocasiona un incremento en el rango de temperaturas, dicho en otras palabras, la temperatura promedio al ir incrementando ha provocado ambientes más secos a través del tiempo, y de esta forma se cumple uno de los supuestos según el Grupo Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

En el uso de estaciones climatológicas de CONAGUA se presentaron inconvenientes como el hecho de que no tienen registros completos, algunas han dejado de operar hace tiempo, cuentan con errores de medición provocado porque las estaciones se encuentran en terrenos de particulares, siendo estos mismos los encargados de la toma de datos, sin embargo, al presentarse otras actividades importantes para ellos, se descuida por días el registro de las condiciones climatológicas, de igual forma, la eficiencia de los equipos juegan un papel importante porque en algunas ocasiones se encuentran errores debido a que el termómetro u otros equipos dejan de funcionar, finalmente al correr el análisis de homogenización se encontraron muchos errores de datos ficticios en las bases de datos; dando como resultado la eliminación de 42 estaciones.

El comportamiento dominante de los índices siendo de forma creciente para la mayoría de ellos, y que por consecuencia prevé el ambiente cálido, con una menor prevalencia de días húmedos anuales. De acuerdo a la investigación por el Grupo Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en 2007 donde menciona los supuestos que limitan la cantidad de agua aprovechable de una cuenca refuerza la conclusión de la presencia de variabilidad climática dentro de la cuenca y que por defecto trae implicaciones ambientales dentro de la región de estudio.

Capítulo 3. Análisis multi-temporal para la determinación de un patrón meteorológico-climático del Lago de Chapala a través del tratamiento de imágenes Landsat

En una cuenca hidrológica influyen y se relacionan diferentes variables, una de ellas es el cambio de uso de suelo, el cual puede presentar modificaciones a través del tiempo, es decir, se considera como un factor antropogénico, dicho parámetro, se comporta de forma generalizada, dinámica, y de igual manera, determina la velocidad de las alteraciones en su entorno (Marsik *et al.* , 2011).

En la actualidad, el uso de la percepción remota en el análisis de la cobertura vegetal aporta integralmente datos sobre los rangos de radiancia, así mismo, el cálculo de variables puede realizarse en múltiples softwares, para finalmente obtener cartas interpretativas y resultados cercanos a la realidad. Es importante señalar que el previo conocimiento del territorio por parte del evaluador es importante en cualquier estudio, debido a que las imágenes en ocasiones tienen errores de resolución o calidad de imagen (Yang y Lo, 2002).

El análisis multitemporal en la cuenca Lerma Chapala facilita el estudio y monitoreo de los ecosistemas. Actualmente, se han visto modificados los ecosistemas por actividades antropogénicas que han tenido efectos perjudiciales al ambiente a escala global, regional y local. La solución de a los problemas se ha desarrollado por medio de indicadores ambientales, es decir, que miden algunos de los atributos ambientales más específicos, dicha herramienta ha ayudado a originar listados de problemáticas ambientales, según el tamaño de la muestra es el costo beneficio, la cual, facilita la toma de decisiones de actores importantes en el tema (Dymond, *et al.* 2001).

Determinación de parámetros

El uso de herramientas como la percepción remota ayuda a gran cantidad de análisis, sin embargo, en la investigación se pretende identificar problemáticas o situaciones que pueden tener influencia en la degradación del lago de Chapala, por lo cual es necesario determinar las condiciones de la zona de estudio, que pueden ser factores importantes,

consecuencia de esto, se determinó el análisis del cambio de uso de suelo a través del tiempo, así como, se calculó la variación en la superficie de agua desde 1986 a 2018; el estudio y relación de los parámetros en el área de influencia ayuda a la identificación de problemáticas, de igual manera, el estudio del parámetro tiene como propósito las respuestas a varias interrogantes como; ¿qué tipo de alteraciones se dan en el lugar?, ¿dónde ocurren?, ¿cuál es su rango de cambio?, ¿cuáles son sus principales patrones de modificación?, ¿qué problemáticas podrían estar influyendo en otras?; este tipo de preguntas se consideran como fundamentales cuando se estudian las condiciones históricas, que a su vez, tienen atribución a situaciones en la actualidad (Marsik *et al.*, 2011).

En la actualidad, el uso de la percepción remota para el estudio de cobertura vegetal es cada vez más frecuente, por sus beneficios en los costos, la obtención de resultados es más rápida, así como, la reducción de visitas a campo o el tener que transitar por zonas poco seguras. Una vez considerando los beneficios de la metodología, se seleccionó el intervalo de tiempo en el estudio, se determinó que serían dos imágenes por año, correspondientes a las temporadas representativas, es decir, en estiaje y lluvia; el periodo de selección sería con un intervalo de tiempo de cinco años entre cada una, debido a una mejor observación de los cambios o alteraciones del ecosistema. En las tablas 3 y 4 se muestran las fechas y especificaciones de las imágenes.

Tabla 3. Selección de imágenes en el período de estiaje. Obtenido de USGS (2019).

Fecha de la imagen	Path y Row	Landsat 3 MSS	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM	Landsat OLI 8
1985-01-04	2946	X			
1986-04-06	2846	X			
1990-03-07	2946		X		
1990-05-03	2846		X		
1995-04-22	2946		X		
1995-05-01	2846		X		
2000-04-19	2946			X	
2000-04-20	2846			X	
2005-03-24	2946			X	
2005-04-02	2846			X	
2010-04-07	2946			X	
2010-04-16	2846			X	
2015-03-12	2946				X
2015-04-22	2846				X
2018-04-05	2946				X
2018-04-14	2846				X

Tabla 4. Selección de imágenes en el período lluvioso. Obtenido de USGS (2019).

Fecha de la imagen	Path y Row	Landsat 3 MSS	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM	Landsat OLI 8
1984-11-04	2946	X			
1984-11-26	2846	X			
1989-10-22	2946		X		
1989-10-22	2846		X		
1995-10-31	2946		X		
1995-11-25	2846		X		
2000-09-10	2946			X	
2000-11-30	2846			X	
2005-11-03	2946			X	
2005-11-12	2846			X	
2010-10-10	2946			X	
2010-11-10	2846			X	
2015-11-23	2946				X
2015-11-16	2846				X
2018-11-15	2946				X
2018-11-24	2846				X

Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

El índice se basa en el supuesto de que el recurso hídrico tiene una fuerte absorción y la vegetación una gran reflectancia del infrarrojo cercano. Fue Mcfeeters S. K. en 1996 que propuso el método del espectro de agua (Gautam, *et al.* 2015). Una vez aplicada la fórmula, se clasificó de forma no supervisada la media K, por medio de dos clases, en donde se resaltó las zonas con presencia de agua superficial. A continuación, se muestra la fórmula:

(3)

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

El lago de Chapala a través del tiempo se sabe ha sufrido cambios en el volumen o superficie de agua; razón por la que se pretende medir el espectro de agua de forma multitemporal, con intervalos de 5 años, así como, el área con cobertura de espectro de agua dentro de la cuenca, la cual, actuará como soporte en la evaluación y relación de variables analizadas dentro de la cuenca de estudio. Con la finalidad de comprender la relación entre el ciclo hidrológico y la degradación del lago de Chapala. De forma general, en la temporada

de estiaje al tener mayor evapotranspiración en la cuenca, es cuando se pierde más cantidad de agua en la misma y de manera específica, en el lago de Chapala.

Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)

El método es ampliamente usado en el estudio de cambio de uso de suelo y puede ser utilizado para medir su relación con la variabilidad climática, además es conocido como herramienta usando el índice de vegetación, derivado de la banda espectral del infrarrojo cercano, utilizando la siguiente ecuación (Ahmed y Akter, 2017).

(4)

$$NDVI = \frac{\text{Banda infrarroja cercana} - \text{banda roja}}{\text{Banda infrarroja cercana} + \text{banda roja}}$$

El análisis de la cobertura vegetal por medio de la percepción remota provee resultados con alta confiabilidad, y que, a su vez, proporciona información de forma más sencilla, es decir, se puede obtener información de forma continua y de fácil acceso, las cuales, cuentan con escalas temporales y espaciales, que son consideradas fundamentales en un estudio. La colección de imágenes multianuales contribuye con la creación de una secuencia de información histórica, en donde se visualizan los cambios y la evolución de la cobertura vegetal en la región. Mucha de la información que deriva en los análisis de uso del suelo, en los últimos 30 años, se adquiere de imágenes Landsat, las cuales, están disponibles en plataformas como USGS (Marsik *et al.*, 2011).

Análisis del NDVI de los diferentes periodos de estudio (lluvia-estiaje)

La cuenca Chapala cuenta con régimen de precipitación diferenciado, la temporada húmeda inicia en mayo y termina en octubre, así como, el estiaje se concentra en los otros seis meses restantes. De igual forma, la temperatura tiene una relación importante en dichas temporadas, debido a que los registros con mayor grados Celsius son en estiaje y viceversa

(Instituto Nacional de Ecología, 2006). Dados los extremos climáticos, se determinó que el análisis tenía que ser en dos temporadas por año, para evaluar la modificación de la vegetación en el tiempo y su relación con la variabilidad climática. En donde, por medio de las estaciones climáticas alrededor del lago, se determinó el comportamiento del clima en la zona, por medio de, la evaluación de datos desde 1960. Con la finalidad de comprender la relación entre el ciclo hidrológico y el estado de la vegetación, así como, la creación de mapas temáticos que ayudaron al cálculo de la superficie de los parámetros.

Proceso de clasificación supervisada al conjunto de datos vectoriales y matriciales de la cartografía del uso de suelo

Con propósito de la selección de parámetros a agregar en la clasificación fue necesaria una búsqueda de bibliografía, en donde, se describiera de forma general el uso y el sector importante en la región. Posteriormente, se inició con el tratamiento y análisis de NDVI, el cual, se realizó mediante los softwares ENVI 5.3 y ArcMap 10.2; de forma más detallada, se utilizó ENVI para el tratamiento, unión y clasificación de las imágenes, de ahí se obtuvieron los resultados preliminares del uso de suelo en el estado de Jalisco y Michoacán, en seguida, se convirtió el archivo en TIF, con la finalidad de poder ser reconocido en ArcGis, en dicho software, se convirtió en un archivo shapefile; donde se limitó la cuenca, para dar paso al cálculo de la superficie de cada uno de los parámetros, es decir, del cuerpo de agua, el asentamiento humano, la agricultura de riego, temporal y protegida, cabe señalar, que esta última solo fue posible obtener resultados a partir de 1990, debido a que anteriormente no era tan usada esa técnica dentro de la cuenca; y finalmente, se calculó la vegetación sana y seca del lugar, una vez creado el mapa se procedió a la extracción del archivo .dbf, donde se utilizó los datos de superficie para la creación de una tabla dinámica, y que, de igual forma se incorporó a un matriz de información por temporada (estiaje y lluvia), con dicha matriz histórica, se elaboraron los gráficos, donde se compara por año seleccionado el uso y cobertura vegetal en la cuenca.

Análisis de la clasificación de uso de suelo de la zona en los diferentes periodos de estudio y sus alteraciones presentadas

Cabe señalar que el uso y análisis de imágenes Landsat 4 del año 1985 se dificultó por la baja resolución de las imágenes, los resultados contienen diferentes errores en donde no se identifica el uso del suelo, sin embargo, se pudo observar que el cambio desde 1985 evidencia el crecimiento económico de la zona, es decir, la cantidad de área cultivada y el tipo de agricultura utilizada, a través del tiempo se observa una mayor cobertura de la agricultura de riego, que se ha incrementado alrededor del 50% su uso en temporada de estiaje (figura 45), sin embargo, la producción por temporal sigue siendo la más recurrente en la región, y a su vez, ha sido la de mayor aumento a través de los años, finalmente, el tipo de agricultura que se ha expuesto como dominante en la región es el cultivo protegido, el cual se ubica en los municipios de Jocotepec y Venustiano Carranza, en los estados de Jalisco y Michoacán, respectivamente. De acuerdo con la figura 45 los años de 1995 y 2018 son los de mayor superficie de agricultura de temporal, con una presencia constante de agricultura protegida, es decir, son zonas en donde se tiene un ambiente controlado (de luz, humedad y nutrientes) para el cultivo. No obstante, la agricultura con riego se limita en esta temporada, por los costos de operación y mantenimiento que eso implica.

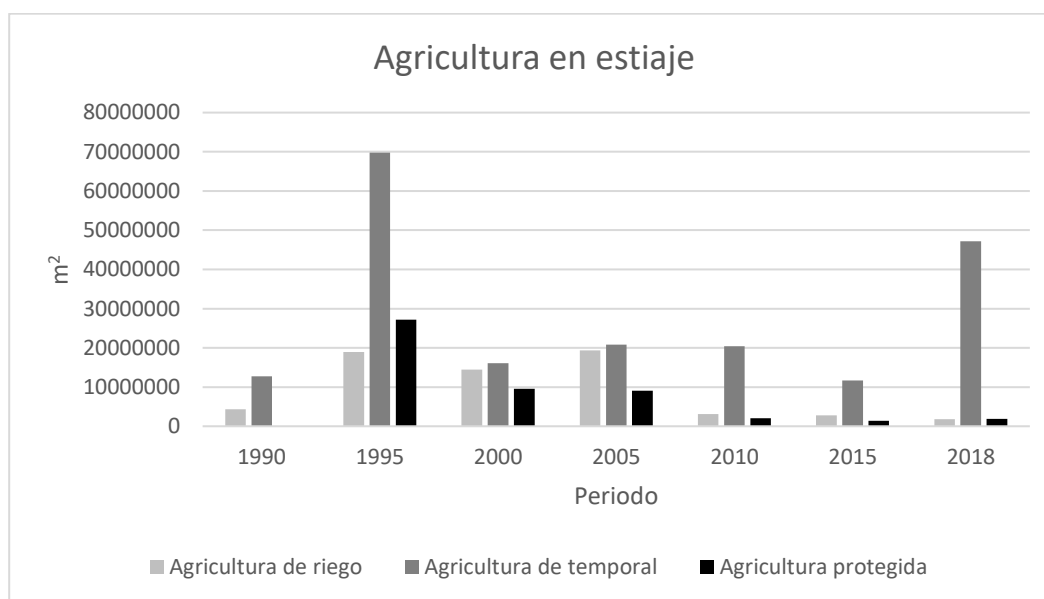


Figura 45. Análisis de diferentes imágenes en temporada de estiaje Landsat del cambio de uso de suelo desde 1985 a 2018.

De acuerdo con la figura 46, en la temporada húmeda se observa un incremento a través de los años de la agricultura de temporal, consecuencia de la disponibilidad de agua. No obstante, la agricultura con riego se ve ampliamente usada, debido a la reducción de costos, en la técnica normalmente se dispone de estructura para el almacenamiento y recolección de agua pluvial. En cuanto a la agricultura protegida se observa un incremento, por lo cual cabe destacar que esta información es reflejo de la onda de luz que emite si están cubiertos o no los macro túneles. Aunque se observa un comportamiento creciente de las zonas de cultivo, existe un mecanismo regulador en la cuenca, es decir, a partir de 2017 se propuso la creación de zonas protegidas en la cuenca alrededor del lago, para la protección de flora y fauna del lugar que prestan importantes servicios ambientales, cabe señalar que el área está registrada a solo la zona montañosa de la cuenca (AIPROMADES, 2017).

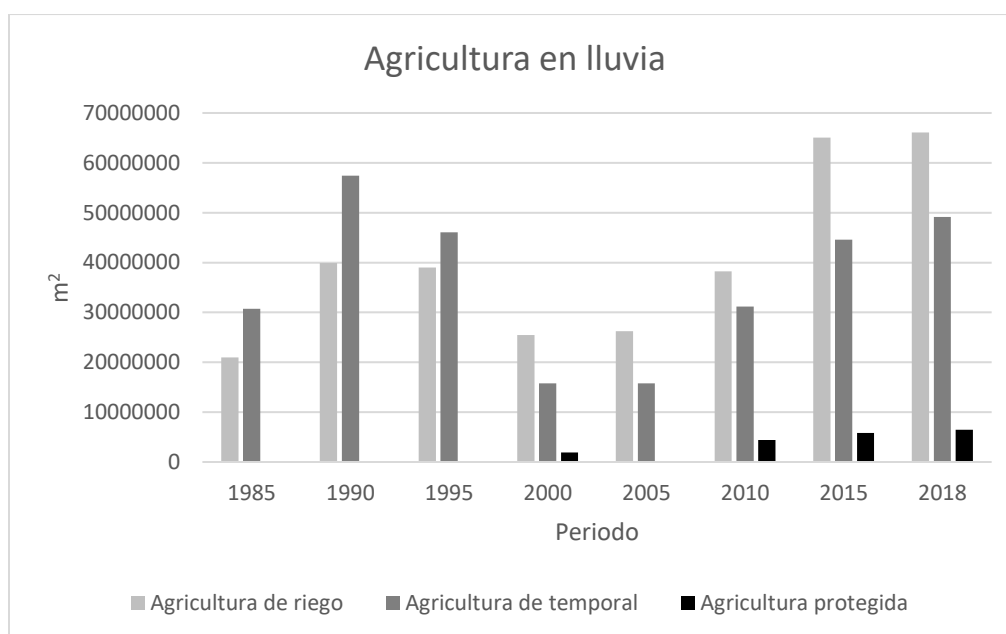


Figura 46. Análisis de diferentes imágenes en temporada de lluvia Landsat del cambio de uso de suelo desde 1985 a 2018.

En la figura 47 se puede observar la vegetación en temporada de estiaje, la cual, se dividió en seca y sana, de manera que cabe señalar que el análisis tuvo que repetirse debido a los valores de superficie, ya que estos se consideraron sospechosos; sin embargo, no fue posible mejorar la interpretación por la mala calidad de resolución, es decir, la presencia del

error de resolución de la imagen satelital, que pertenece a Landsat 4, ocasiona un error en la interpretación de zonas. No obstante, a partir de 1990 se cuenta con unos mejores resultados, dado que la vegetación sana presenta una oscilación, en donde en el año de 1995 empieza un comportamiento de decrecimiento, es hasta 2005 que se ve una recuperación de la misma, sin embargo, en los años posteriores existe un descenso en cuanto a su presencia. De forma análoga, se obtuvieron resultados de la vegetación seca, la cual, tiene una variación, con un comportamiento de descenso a través del tiempo, cabe agregar, que el año 2005 tiene una menor superficie de vegetación seca.

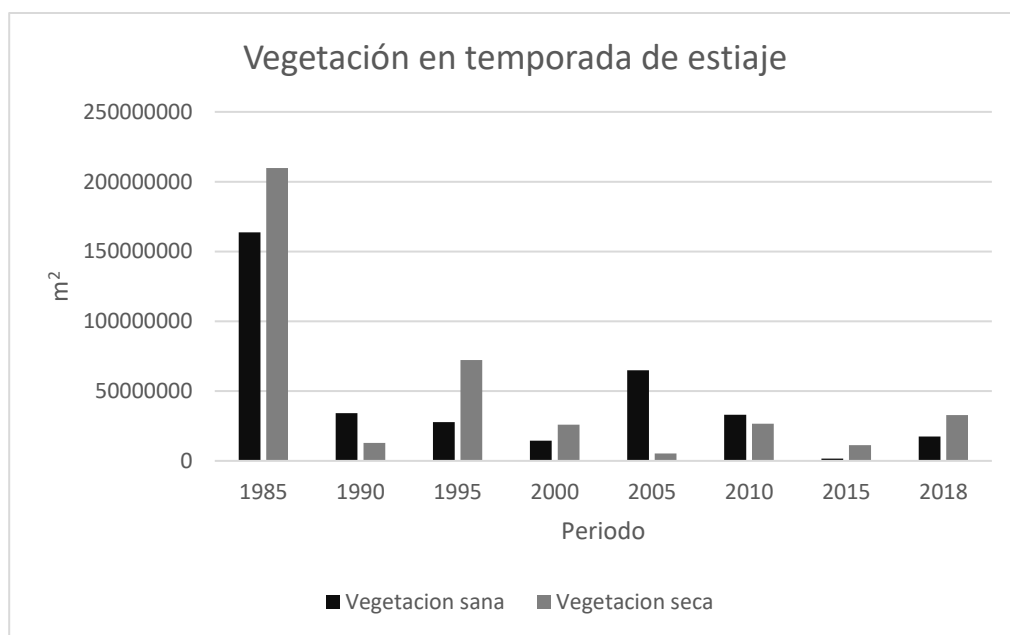


Figura 47. Análisis de diferentes imágenes en temporada de estiaje con imágenes Landsat de la vegetación.

La figura 48 muestra el comportamiento de la vegetación en la temporada húmeda, con una variación diferenciada, es decir, en los años desde 1985 a 2005 domina el tipo de vegetación seca, a pesar de ser la temporal lluvioso, y es hasta 2010 que muestra un incremento mayor de la vegetación sana. Cabe señalar que el tipo de imagen adquirida para 1985 ya contaba con mejor resolución, o sea, es un tipo de imagen Landsat 5. Es probable que el resultado este en función a la observación y comparación de los gráficos 46 y 48; los cuales, se considera es inversamente proporcional una de otra. Es importante considerar un cotejo, en donde se verifique con la superficie de vegetación seca y ver si corresponde con

los análisis de variabilidad climática, para determinar si existe una relación entre las variables.

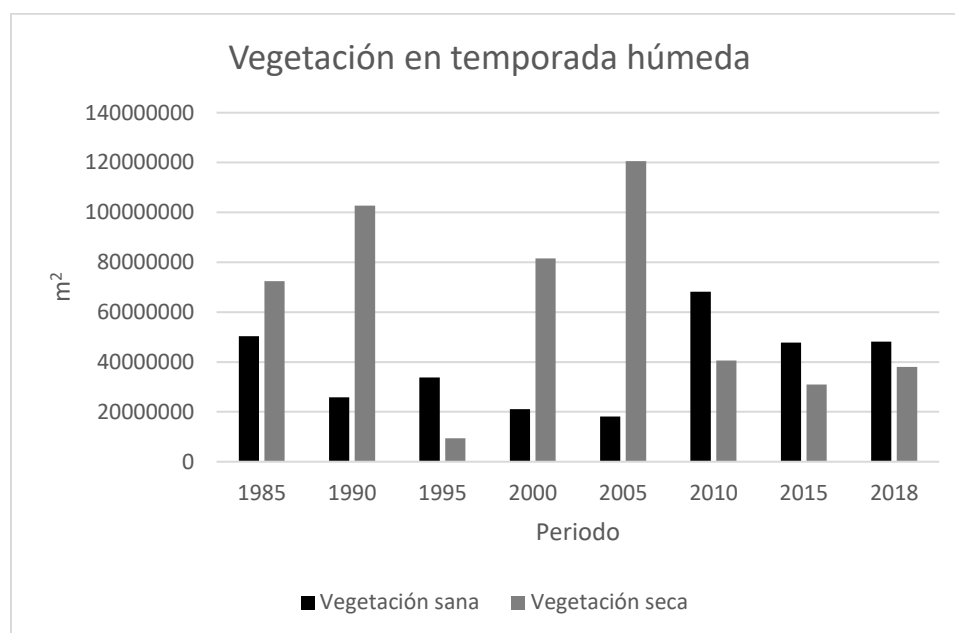


Figura 48. Análisis de diferentes imágenes en temporada húmeda con imágenes Landsat de la vegetación.

Discusión sobre los resultados obtenidos

De acuerdo a la observación y comparación de resultados de los mapas temáticos y los gráficos de la superficie, se encontró que la proporción entre categorías muestra un comportamiento ascendente en las áreas de agricultura de temporal, resultando a su vez, la técnica que trae consigo un menor impacto de la explotación del recurso hídrico en la temporada, es decir, hay un mejor aprovechamiento en el periodo de mayor disponibilidad de este, así mismo de acuerdo al análisis de imágenes satelitales se observa un decrecimiento de la agricultura en las áreas montañosas, consecuencia de reglamentaciones y acuerdos firmados entre municipios, así como, la creación del área natural protegida “el anillo verde” ubicada en la sierra de la cuenca. El cambio de uso de suelo ha ido dependiendo del tipo de desarrollo de la región, en Michoacán y parte del territorio de Jalisco se ha incrementado la agricultura de temporal, sin embargo, el riego se utiliza por lo general en temporada húmeda

para eficientar los procesos de crecimiento vegetal, mientras que la zona nororiente de Jalisco ha incrementado las zonas con cultivo protegido, es decir, con la técnica se consigue una mayor eficiencia del recurso hídrico, por otra parte, el desarrollo turístico es una base importante del territorio alrededor del cuerpo de agua. Sin embargo, al visualizar los resultados de vegetación y agricultura se encontró un comportamiento inversamente proporcional, ya que mientras el área destinada a agricultura incrementa, la vegetación sana se disminuye. La observación dio pie a una observación de los diferentes mapas, en donde se visualiza que ha habido un cambio de uso de suelo a través del tiempo, el cual, ha ido en aumento, en especial de las zonas con cultivo, así como, el incremento de población alrededor del lago.

El uso de tecnologías satelitales para el análisis del índice normalizado de la vegetación presenta beneficios de eficiencia y disminución de costos, sin embargo, cuando se intenta tomar imágenes de los primeros Landsat hay errores de resolución o el tipo de tecnología de esa época, y en donde se vuelve complicado un correcto análisis del valor del píxel por medio del software ENVI 5.3, a esta situación se le agrega la generación de valores sospechosos dentro de las imágenes, en donde hay áreas con una onda de color similar a otra clasificación, por ejemplo, en zonas donde no existe una cobertura vegetal, la cual, pertenece a algún cuerpo de agua intermitente, el software confundió el valor del píxel y lo determinó como urbana.

Capítulo 4. Relación geoespacial entre la degradación de la superficie del Lago de Chapala y la presencia de la variación climática en la cuenca Lerma Chapala.

La hidrósfera es una de las variables mayormente ligadas a la calidad de vida, la cual, cubre alrededor de 71% del planeta; sin embargo, en los últimos años se ha demostrado la disminución de agua aprovechable en el planeta, como consecuencia de una mayor presencia de variabilidad climática y la alta explotación del recurso, estos dos factores han ocasionado sequías importantes en partes del planeta, ejemplo de ello, es lo ocurrido con el lago Chad que desapareció casi por completo a pesar de haber sido uno de los lagos con mayor cobertura a nivel mundial. Es aquí donde es importante señalar que los patrones de comportamiento de algunas variables influyen en otras, es decir, para obtener un mejor resultado entre las interacciones entre las actividades humanas y los ambientes naturales, es necesario un manejo más eficiente del agua, así como, una consciente toma de decisiones de los actores clave. Además, se considera al cambio de uso de suelo como parte importante en la interacción con la calidad del ambiente, es decir, tiene un impacto directo a los sistemas naturales. En la actualidad, el uso de imágenes satelitales con una cobertura multianual, ayuda a la integración de datos en una región (Amir *et al.*, 2014). No obstante, la percepción remota se señala como un método decisivo para la obtención de resultados en los procesos ambientales, el cual, se puede relacionar fácilmente con la presencia de variabilidad climática (Cui *et al.*, 2019).

El capítulo se basa principalmente en la identificación de las modificaciones en la superficie del lago de Chapala a través del tiempo, así como, su relación con los resultados de la variabilidad climática y el cambio de uso de suelo de la región. Cabe señalar que, gracias a la percepción remota, así como, a los Sistemas de Información Geográfica fue posible el estudio de la cuenca de forma asequible y breve; es decir, las técnicas utilizadas asisten en la disminución de costos, así como, el trabajo en campo.

Principales usos y aprovechamientos históricos del agua del Lago de Chapala

El país se ha basado en políticas de desarrollo económico urbano industrial, efecto de ello, son los recursos hídricos que han sido orientados como base para el progreso de la sociedad, teniendo un sector agrícola dependiente de la industria. En los últimos 50 años se ha incrementado la demanda en el recurso, lo que ha llevado a una intervención a los ecosistemas, sobrepasando los límites inmediatos de las cuencas (Cotler *et al.*, 2004).

En la cuenca Chapala se presentó un periodo de lluvias escasas en los 40's y durante 13 años prevaleció un ambiente de escasez en la región y en el país, en el caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) se tuvo un constante crecimiento poblacional e industrial en ese tiempo, por lo que originó una sobredemanda del agua y por defecto se inició la búsqueda de nuevas fuentes de aprovechamiento, como consecuencia, fue en el lago de Chapala (LC) a través del río Santiago que se encontró la mejor manera de aliviar la demanda. Fue en la década de 1950 cuando la cuenca Lerma Chapala concentró su desarrollo en la industria, ocasionando un incremento de la zona urbana, dando paso a una de las regiones más importantes del país, con recursos básicos que aseguraban el crecimiento y en donde el agua jugaba un papel importante, sin embargo, se empezó con problemas en la oferta, comprometiendo la prosperidad de la región, debido a ello se inició con la explotación por medio de pozos en la cuenca, no obstante, la demanda del recurso en aguas arriba vulneraba a la región baja. Por otro lado, a finales de la década de 1980 se inició con la construcción del acueducto que llevaría directamente el agua a la Zona Metropolitana de Guadalajara desde el lago de Chapala y que provocaría la escasez del cuerpo de agua con el tiempo, en los años 1950, 1991, 1992 y 2001 ocurrieron las peores crisis registradas llegando a cotas alrededor de 90 metros, lo que provoco dejar de ser parte importante de los planes de desarrollo en la cuenca. Es importante mencionar que la dinámica de almacenamiento del espectro de agua depende de las entradas cuenca arriba y de las salidas, así como, de las precipitaciones; por lo cual se considera un problema importante que ha ocasionado el bajo volumen del lago de Chapala, debido al crecimiento urbano e industrial de la Zona Metropolitana de Guadalajara, así como, los altos índices de contaminación vertidos a los cauces alimentadores (Durán y Torres, 2003).

Dinámica actual de los aprovechamientos del uso del recurso del cuerpo de agua

La red de drenaje que desemboca en el lago de Chapala es muy amplia, sin embargo, depende de las corrientes perennes que llevan agua todo el año, es decir, que la única fuente de abastecimiento continua es el río Lerma. Sin embargo, de acuerdo con CONAGUA, se le considera a la cuenca Chapala como deficitaria, con un grado de presión de media a fuerte y con una disponibilidad per cápita muy baja, es decir, la disponibilidad de agua no alcanza a abastecer a todos los habitantes de la región (Gobierno de Jalisco, 2011). En la tabla 5 se observa la clasificación mundial adaptada por CONAGUA.

Tabla 5. Clasificación según la disponibilidad de agua, utilizado por CONAGUA.

Categoría	Disponibilidad m³/hab/año
Muy baja	1 000 o menos
Baja	1 000 – 5 000
Media	5 000 – 10 000
Alta	10 000 o más

Al intentar definir la situación actual del aprovechamiento del recurso, es importante tomar en cuenta a la población que reside dentro de la cuenca. Es fundamental comprender que la modificación en la demanda de agua está estrechamente relacionada con el crecimiento poblacional y el desarrollo de las actividades productivas (Gobierno de Jalisco, 2011).

Actualmente, los municipios alrededor del lago han definido sus principales actividades económicas, lo que a su vez ha determinado el uso de suelo. La zona turística se encuentra principalmente en la parte noroccidental, en el estado de Jalisco, en donde ha incrementado la población; sin embargo, la actividad pesquera está restringida a pequeñas zonas debido a la apropiación de la costa, por contaminación o turismo (Pedroza y Catalán, 2017); el mayor aprovechamiento del recurso se destina a la Zona Metropolitana de Guadalajara, el cual, alivia la demanda de agua hasta 60% de las necesidades de la población, no obstante, el agua que necesita al sector agrícola se limita, es decir, principalmente se da en temporada de lluvia (Boehm, 2002).

Correlación de los resultados del análisis en R-ClimDex y RHTest de la variabilidad climática con los resultados de las variables del tratamiento de imágenes para determinar el patrón meteoro-climático del entorno del Lago de Chapala

La disminución o desaparición de los cuerpos de agua es la mayor consecuencia al presentarse la variabilidad climática, poniendo en peligro a las comunidades, debido que es la causa a una disminución de la disponibilidad de agua para consumo humano, de igual forma, se determina para el sector industrial, donde muchos de sus procesos dependen del recurso (Silwal, 2010).

La extracción de agua en la cuenca Chapala se ha visto implicada en la demanda de la población y el crecimiento industrial de la ZMG y de la cuenca Lerma Chapala; a través del tiempo se ha reducido la superficie del lago, no obstante, el estudio se realizó solo por los años con disponibilidad de imágenes Landsat, a partir de 1985 hasta 2018, con intervalos de 5 años entre imágenes seleccionadas, así como el análisis por periodos de estiaje y de lluvia, en la figuras 49 y 50 se muestran las comparaciones de las superficies de cuerpos de agua en la cuenca y la correspondiente al lago de Chapala de acuerdo al año seleccionado, de igual forma, se divide en dos temporadas: en estiaje y húmedo.

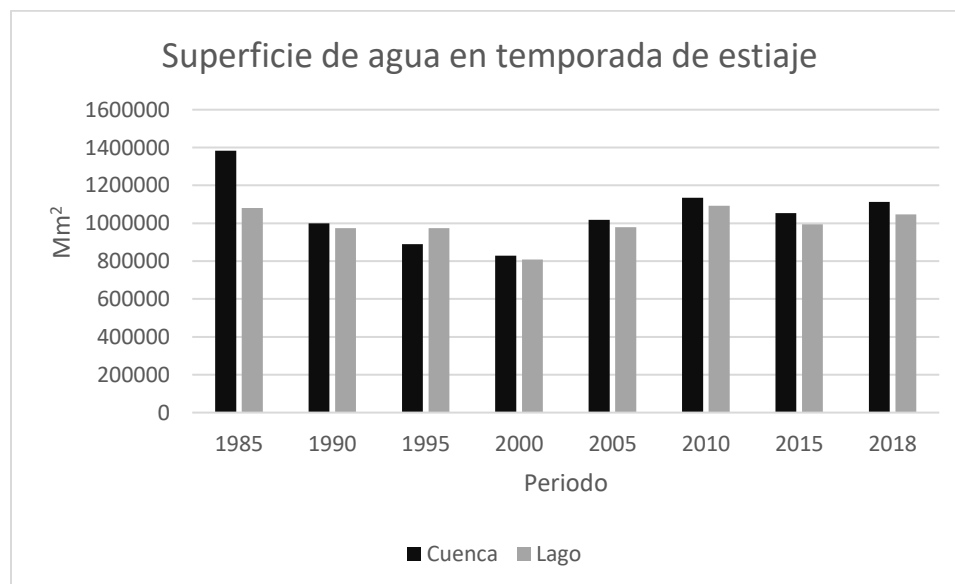


Figura 49. Gráfico comparativo del Índice Normalizado de Agua (NDWI), a través de imágenes Landsat.

El cambio en la disponibilidad de agua superficial ha tenido alteraciones a través del tiempo, no obstante, la década de los noventa es la que se ha caracterizado por un menor recurso, de forma antagónica, la mayor superficie se presentó en el año de 1985, de manera que es importante mencionar que el lago de Chapala se ha mantenido en estado regular a partir de 2010 a 2018 (figura 50).

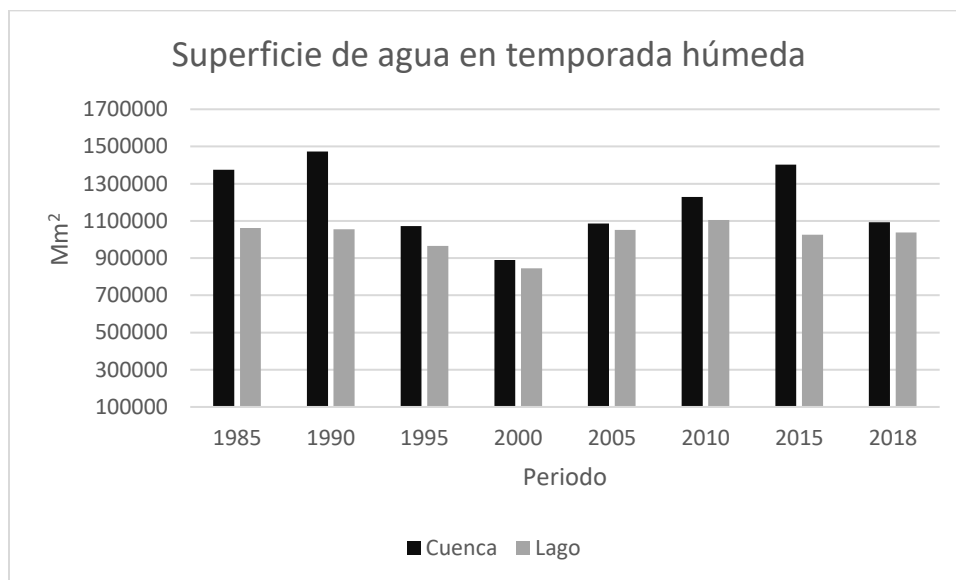


Figura 50. Gráfico comparativo del Índice Normalizado de Agua (NDWI), a través de imágenes Landsat.

De acuerdo con la figura 50, la cantidad de agua aprovechable en la cuenca tiene su mayor almacenamiento en los años de 1985, 1990 y 2015, no obstante, la superficie del lago de Chapala no cuenta con los mismos datos, es decir, los mejores registros se obtuvieron en 1985, 1990, 2005 y 2010. La disponibilidad de agua entre periodos intraanuales se ven modificados a consecuencia del aumento de precipitaciones en la cuenca, lo que corresponde a una mayor entrada de agua.

A través de los años se tiene la información climática de ambientes difíciles en la zona de estudio, en los años donde presenta una disminución de la cobertura de agua existe una mayor anomalía de la temperatura máxima y una anomalía negativa para la temperatura mínima, creando un ambiente seco; aunado a un comportamiento y tendencia decreciente de la precipitación. En la década de los noventa hasta aproximadamente 2005 se registró una

disminución en la lluvia, provocando una pérdida de cobertura del lago de Chapala, sin embargo, a partir de dicho periodo muestra una notable recuperación la cuenca y el cuerpo de agua, de forma que esta mejoría corresponde a los años donde se firmaron acuerdos por los municipios aledaños, por lo cual, se declaró como área natural protegida al lago en 2008, así como, la utilización de otras fuentes de agua y tandeos para la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).

El proceso de NDWI que se muestra en las figuras 49 y 50 se observa con un comportamiento oscilatorio en la superficie de agua en la cuenca y a su vez en el lago, no obstante, se identifica una disminución respecto al plano de 1985, donde existe una mayor cobertura superficial del recurso hídrico en ambos, las décadas de 1990 y del 2000 son las que históricamente han tenido una menor presencia del vital líquido, en 2015 se mejora la cantidad de agua en cuenca en periodo húmedo, sin embargo, en lago existe un decrecimiento de su área, respecto a 2010. Finalmente, en 2018 se presenta un ligero incremento en el lago de Chapala, no obstante, la superficie analizada es menor a la presentada en 2015.

De acuerdo a los datos climáticos analizados, donde hay una fuerte presencia de indicadores de variabilidad climática en la cuenca Lerma Chapala, aunado al incremento de cambio de uso de suelo para aprovechamiento agrícola en la cuenca Chapala, se ha provocado un ambiente áspero alrededor del lago, la disponibilidad de agua se ha visto vulnerada por aspectos climáticos, como la cantidad de lluvia, el ambiente seco generado con altas temperaturas máximas, y a su vez con bajas temperaturas mínimas, comprometiendo el desarrollo económico de la región.

La correlación de las variables; la variación climática, el uso de suelo y la superficie de agua en la cuenca y en el lago; se realizó por medio una detenida observación y correlación de los comportamientos de los diferentes resultados de las variables, como se muestra en la figura 51

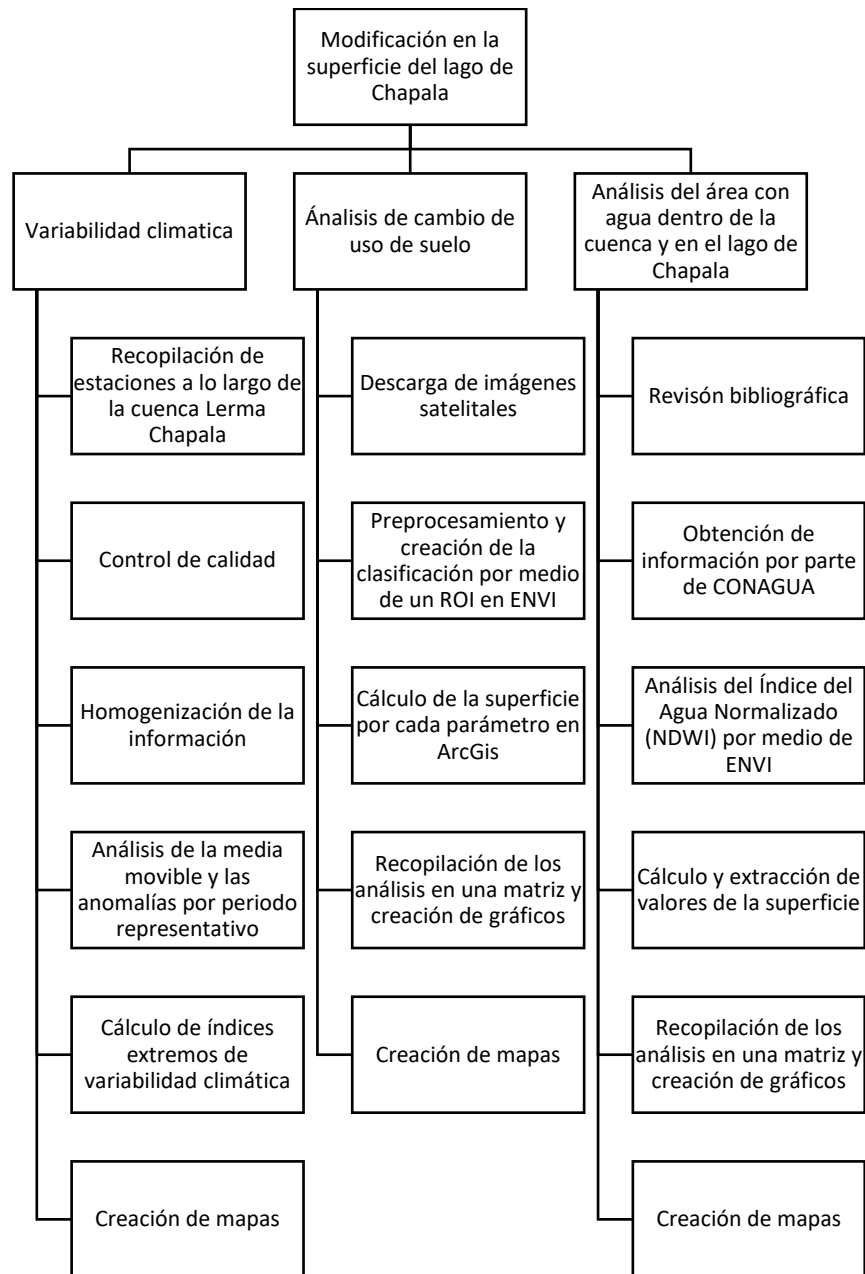


Figura 51. Actividades que ayudaron al cumplimiento del objetivo general.

Discusión de resultados obtenidos

El uso y análisis de tecnologías para la delimitación de una cuenca tiene diversas funciones, tales como, la identificación de los cauces y cuerpos perennes e intermitentes, SIATL, fue una de las herramientas con mayor utilidad para el entendimiento de la zona de estudio, de forma análoga se analizó el tercer informe de IPCC (2007) donde relaciona condiciones de mayor presencia de flujos intermitentes en una cuenca, con una mayor vulnerabilidad de los recursos hídricos, aunado a que en los países con menor desarrollo, encontrados principalmente en latitudes medias, se tienen altas modificaciones en la precipitación. Es decir, se presenta una alta vulnerabilidad hídrica en la región de estudio debido a una alta presencia de cuerpos y corrientes intermitentes, de esa manera se identifica que el espectro de agua es dependiente de la precipitación y evapotranspiración que tenga, es decir, que cuenta con una mayor fragilidad ambiental. Además, se agrega otro factor de vulnerabilidad en la zona, o sea la baja altitud en el área colindante a Michoacán, por lo cual se cuenta con una sola corriente perenne, las demás escorrentías son consideradas intermitentes por su condición dependiente al período húmedo, de igual manera, los ciclos lluviosos se definen solo durante el verano; no obstante, de acuerdo, al análisis de índices extremos se prevé un incremento de lluvias intensas y muy intensas, dicho resultado cobra mayor relevancia al identificar que a una distancia de 500 metros del cuerpo de agua, se localizan 210 localidades, dicho de otra forma, las poblaciones de la cuenca presentan un grado muy alto de vulnerabilidad debido a las condiciones que imperan en la región. Para concluir, las consecuencias de la mala planeación de la región, donde existe una alta dependencia económica a las actividades alrededor del lago, así como, el crecimiento poblacional en la zona, han generado una mayor explotación del recurso hídrico.

Otro aspecto importante para el entendimiento del problema fue el registro de CONAGUA (2014) con respecto a la Ley de Aguas Nacionales de la variación en el almacenamiento de agua del lago de Chapala, en el cual se observa mayormente una acumulación negativa hasta 2014, dado que es consecuencia de un probable mal manejo del agua. Otro aspecto con registro, es el tipo fuente de abastecimiento predominante en el lago, el cual, se da por precipitación directa al cuerpo de agua y por cauces naturales, donde las corrientes de agua cobran mayor relevancia para la alimentación del espectro, esta condición

promovió la investigación de la cantidad de obras hidráulicas existentes en la cuenca, es decir, dentro de la región Lerma Chapala; en total se ubican 521 obras, y los estados con mayor infraestructura son: Guanajuato, Michoacán, Estado de México y Jalisco; Sin embargo, fue en 1997 cuando The World Commission on Dams | International Rivers inició la discusión del impacto ambiental y social de las presas, modificando el curso natural de las corrientes y ocasionando un déficit en la zona baja de las cuencas; según Cotler y Gutiérrez (2005) el incremento de infraestructura ha ocasionado una fragmentación importante a las comunidades y al sector agrícola que dependen del agua disponible para su subsistencia.

De acuerdo al informe de IPCC en 2007, en donde se determinan las variables implicadas en la disponibilidad de agua aprovechable en una cuenca, así como, los datos disponibles en CONAGUA, dio pie a la propuesta de variables importantes a estudiar dentro de la cuenca, las cuales son, la temperatura, la precipitación, el uso y cubierta de suelo y las características de suelo y subsuelo; sin embargo, se hizo una adecuación en el área de estudio debido al tiempo e información disponible, dicho de otra manera, se tuvo que discernir del análisis de agua subterránea, consecuencia de la poca información disponible y el tiempo proyectado. De acuerdo con Karmalkar et al. (2011) se prevé un importante incremento de temperatura en México y Centro América donde la estructura bimodal desaparece de la región, así como, una disminución considerable de precipitación especialmente en México, considerándolo un país muy vulnerable a la variabilidad climática, en relación con los resultados obtenidos de variabilidad climática se encuentra una coincidencia importante con el documento anteriormente descrito, la temperatura máxima promedio de la cuenca Lerma Chapala ha incrementado hasta 0.7°C , no obstante, el resultado de temperatura mínima promedio se registra un decrecimiento de 0.2°C y a su vez, un mayor rango entre temperaturas resulta en promedios altos que ocasionan ambientes más secos, de igual forma se pueden observar oscilaciones en la precipitación de la zona con una disminución de la media acumulada por períodos representativos. Cabe señalar que de acuerdo con el IPCC de 2007 dicho incremento en la temperatura es reflejo con el comportamiento de gases de efecto invernadero o gases antropogénicos presentados en el mismo periodo, en donde aumentaron hasta 70% desde el año 1970 al 2004.

De acuerdo a la calidad de la información de las diferentes estaciones se siguió con el proceso de homogenización que Yan *et al.* (2014) describe como una técnica de ajuste en base a la evaluación de las tendencias en donde se permite centrar la atención en la media climática para futuros ajustes climáticos extremos, los resultados de homogenización realizados muestran un mejoramiento de los valores, identificando valores sospechosos e interpolando datos faltantes de la serie, cabe señalar, que dicha herramienta ayudó a la eliminación de estaciones sospechosas. El uso de RClimDex es usado para reconocer la variabilidad climática de una región, ejemplo de ello, es la investigación de Beharry *et al.* (2015) donde se analiza por medio de RClimDex la variabilidad climática en Ontario, Canadá, por lo cual, es importante mencionar que se encuentran coincidencias importantes con los resultados obtenidos, del mismo modo, se identificó un incremento en los valores de temperatura promedio y la disminución de la precipitación, los cuales a su vez, ocasionan ambientes más hostiles.

Conforme al estudio realizado por Muradyan *et al.* (2019) donde se evalúa la vegetación y su dependencia a factores climáticos, se demuestra que el incremento de temperatura tiene un efecto negativo en la vegetación árida o semi – árida y positivo en ambientes húmedos. Cabe señalar que de acuerdo a los resultados de NDVI, se obtuvo una relación de la variabilidad climática, la cual presenta mayores temperaturas y tiene disminución de lluvias anuales, con una disminución de zonas con vegetación sana, y que, a su vez, se reafirma con la reducción de superficie de agua en la cuenca y en el lago en esos periodos, así mismo, se observa un comportamiento inversamente proporcional con los periodos de tiempo más húmedos, es decir, los años con mayor cantidad de lluvia coincide con un incremento de vegetación sana y con la cobertura de agua en la cuenca y el lago.

Conclusiones

- ❖ La determinación de variables se dio conforme a la disponibilidad de información recabada por CONAGUA, la cual, a su vez tuvo que ser filtrada por la cantidad de datos sospechosos encontrados en las bases de datos. Cabe señalar que al hablar de hidrología implica varios factores de influencia, una de ellas fue el cambio de uso de suelo, el cual se analizó desde 1985 a 2018, y donde se encontró que la agricultura y las ciudades son las que más han crecido, sin embargo, la superficie de agua dentro de la cuenca y en el lago guardan estrecha relación en cuanto a la presencia de la vegetación seca o sana.
- ❖ No obstante, se consideró que el análisis de la disminución de superficie del lago de Chapala conllevaba un contexto más amplio, en el cual, fue necesario describir el uso y aprovechamiento que se le da al agua del cuerpo de agua y las probables implicaciones del manejo del recurso cuenca arriba, cabe señalar que se obtuvieron consecuencias de las obras hídricas construidas a lo largo del río Lerma, los cuales merman la cantidad en el flujo de agua de la corriente, sin embargo, de acuerdo con la investigación bibliográfica realizada, se obtuvo que en el estado de Guanajuato predominan condiciones de disminución de la corriente y por lo cual, implica un decaimiento en cuanto a la cantidad del recurso que llega al lago de Chapala por medio del río Lerma.
- ❖ Es importante mencionar que de acuerdo con el análisis de la degradación del lago desde 1985 hasta 2018, se encontró que existe una disminución constante en la superficie de agua del espectro, donde el periodo abarcado desde 1995 al 2000 es el que menor área ha tenido el cuerpo de agua y aunque en 2015 incrementó la superficie de agua en la cuenca, no sucedió lo mismo con el lago, este tipo de comportamiento lleva a concluir que aunque la variabilidad climática juega un papel fundamental en la problemática existen factores antropogénicos externos que impactan de manera directa al área cubierta de agua. Cabe señalar que la zona comprendida por Michoacán es la más afectada cuando se presenta un fenómeno de degradación del lago debido a las bajas altitudes que tiene el estado a diferencia de la zona montañosa que se ubica en Jalisco.

- ❖ Es importante mencionar que el estudio por periodos representativos de 30 años de cada variable (temperatura máxima, mínima y precipitación) ayudó al entendimiento de la dinámica climática en la región, en donde a partir del 2000 hasta 2016 existe un incremento alrededor de 0.66° C de la temperatura máxima en la cuenca y una disminución de la temperatura mínima de 0.25° C, este tipo de comportamiento genera ambientes más secos en la región, no obstante, cabe señalar un elemento importante a considerar, es decir la precipitación, que según el promedio móvil ha disminuido la precipitación hasta 32.27 mm y que, de acuerdo con los índices extremos se espera una mayor cantidad de lluvias extremas. Dicho de otra manera, dichos resultados apuntan a la fuerte presencia de la variabilidad climática en la región desde aguas arribas, y la cual, a su vez afecta a la única corriente perenne que llega al lago de Chapala.
- ❖ Por medio de un análisis detallado de los resultados y la información recopilada se encuentra que, si hay presencia de variabilidad climática en la región Lerma Chapala, la cual, se considera que es un factor importante en relación a la cantidad de agua que le llega al lago de Chapala por medio del río Lerma, sin embargo, los elementos de cambio de uso de suelo, la retención del agua en cuenca arriba y la explotación del cuerpo de agua para grandes ciudades como la Zona Metropolitana de Guadalajara, son los que ejercen mayor presión sobre el lago. Dicho de otra manera, el uso y aprovechamiento que se le dé al agua, así como, los programas impulsados por el gobierno en el territorio juegan un papel importante en la conservación o degradación del vaso regulador.

Recomendaciones

Un elemento importante por considerar es la generación de proyectos para la mitigación de posibles afectaciones a el cuerpo de agua, que impulse a la generación de nuevas investigaciones, así como, el impulso y la implementación de nuevas tecnologías de diagnóstico y de solución de problemáticas ambientales, en especial de agua. Finalmente, es necesario la participación e involucramiento de actores clave, así como, de la población en general, lo cual, al integrar dichos elementos se traduciría en una mejor gestión del recurso agua en la región.

Referencias

- Aguilon, E. (2006). Diagnóstico energético e hidráulico del estado de Michoacán. *UNAM*.
- Ahmed, K. R., & Akter, S. (2017). Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8(January), 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.010>
- AIPROMADES | Lago de Chapala. (s/f). Recuperado el 1 de julio de 2019, de <http://aipromades.org/>
- Amiri, F., Rahdari, V., maleki najafabadi, S., Pradhan, B., & Tabatabaei, T. (2014). Multi-temporal landsat images based on eco-environmental change analysis in and around Chah Nimeh reservoir, Balochestan (Iran). *Environmental Earth Sciences*, 72(3), 801–809. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-3004-9>
- Anónimo. (s/f). *La Cuenca Hidrográfica*. Recuperado de https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/83/2/Unidade_1.pdf
- Bautista-Ávalos, D. (2013). *Estructuración De Un Modelo Para Identificar El Impacto De La Contaminación De Fuentes Difusas En La Subcuenca De Chapala*. 1–74.
- Beharry, S. L., Clarke, R. M., & Kumarsingh, K. (2015). Variations in extreme temperature and precipitation for a Caribbean island: Trinidad. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3–4), 783–797. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1330-9>
- Boehm, B. (2002). *Agua tecnologia y sociedad en la cuenca Lerma Chapala*.
- Budyko, M. (1977). *Climate change*.
- Buzai, G. (2009). *Análisis espacial con sistemas de información geográfica: sus cinco conceptos fundamentales*. 7(4), 163–195.
- Cano Sánchez, L. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). *Wetlands*, 7(1051), 1–12. Recuperado de <http://www.citeulike.org/user/LNCScatalogo/article/10575117>

- Carrillo, E. (s/f). *Cambios climáticos en Guadalajara*. Recuperado de <http://www.gaceta.udg.mx/Hemeroteca/paginas/365/365-9.pdf>
- CEA Jalisco - Lago de Chapala. (s/f). Recuperado el 20 de julio de 2019, de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/#dimensiones>
- CentroGeo. (s/f). LOS MUNICIPIOS Y LOCALIDADES RIBEREÑAS. Recuperado el 25 de abril de 2019, de <http://mapas.centrogeo.org.mx/ciberatlas/chapala/lagoyentorno/hombre/municipio.htm>
- Chávez Alcántar, A., Velázquez-Machuca, M., Pimentel Equihua, J. L., Venegas-González, J., Montañez Soto, J. L., & Vázquez Gálvez, G. (2011). Hidroquímica de las aguas superficiales de La Ciénega de Chapala e índice de calidad de agua. *Terra Latinoamericana*, 29(1), 83–94.
- Comisión Estatal del Agua. (s/f). Nivel del Lago de Chapala. Recuperado el 25 de abril de 2019, de <https://www.ceajalisco.gob.mx/notas/2017/bol205.php>
- CONAGUA, & CFE. (2013). Inventario Nacional de Presas y Embalses. *Tecnología y ciencias del agua*, IV(4), 179–185. Recuperado de <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/inventario-presas-y-embalses/>
- Cotler, H., & Gutiérrez, S. (2005). Inventario y evaluación de las presas en la cuenca Lerma-Chapala. *Instituto Nacional de Ecología México*, 1–16. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Inventario+y+evaluaci?n+de+presas+de+la+Cuenca+Lerma-+Chapala#0>
- Cotler, H., Priego, Á., Rodríguez, C., & Enríquez, C. (2004). Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala. *Gazeta Ecológica*, 71(Marzo-Junio), 79–92.
- Cui, X., Guo, X., Wang, Y., Wang, X., Zhu, W., Shi, J., ... Gao, X. (2019). Application of remote sensing to water environmental processes under a changing climate. *Journal of Hydrology*, 574, 892–902. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.04.078>
- Davydova, V., & Frias, H. (2016). *Detecting climate change signals in Jalisco , Mexico .*

(April).

Davydova, V., & Romero, J. (2011). *State of the Climate in 2010 . Regional Climate . North America : Mexico*. (June 2011).

Delgado, H. (1996). Los glaciares del Popocatepetl. *Ciencias*, 41, 24–32. Recuperado de <https://www.revistaciencias.unam.mx/en/148-revistas/revista-ciencias-41/1221-los-glaciares-del-popocatepetl-¿huéspedes-efímeros-de-la-montaña.html>

Domínguez-Domínguez, O., & Pérez-Ponce de León, G. (2007). Los goodeidos, peces endémicos del centro de México. *Biodiversitas*, 75, 12–15.

Durán, J., & Torres, A. (2003). *Introducción En México , del periodo de los cincuenta a la actualidad , el interés ha sido fundamentalmente atender las. 1.*

Dymond, J. R., Begue, A., & Loseen, D. (2001). Monitoring land at regional the role of remote sensing *J. Jag*, 3(2), 162–175.

EPA. (2009). *The Effect of Climate Change on Water Resources and Programs*. 40.

Eriyagama, N., Thilakarathne, M., Tharuka, P., Munaweera, T., Muthuwatta, L., Smakhtin, V., ... Udamulla, L. (2017). Actual and perceived causes of flood risk: climate versus anthropogenic effects in a wet zone catchment in Sri Lanka. *Water International*, 42(7), 874–892. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1373321>

Gautam, V. K., Gaurav, P. K., Murugan, P., & Annadurai, M. (2015). Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>

Hansen, A. H., León, Z. A., & Bravo, I. L. (1995). Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México*, 3, 55–59.

Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (s/f). *Impactos sobre los recursos hídricos*. 303–354.

IMTA-SEMARNAT. (2009). *Estrategía general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la Cuenca Lerma-Chapala*. 250.

- Instituto Nacional de Ecología. (2006). *Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala*. 1–198. Recuperado de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=493
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s/f). SIATL | SIMULADOR DE FLUJOS DE AGUA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Recuperado el 25 de abril de 2019, de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- IPCC. (2007). “Cambio climático 2007: Informe de síntesis”. ISBN 92-9169-322-7. En ... *de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra:*
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: Regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, 37(3), 605–629. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9>
- Lago Chad - EcuRed. (s/f). Recuperado el 19 de julio de 2019, de 2018 website: https://www.ecured.cu/Lago_Chad
- Loera, M. (2010). La disminución del Lago de Chapala afecta hasta la región de los Altos | Universidad de Guadalajara. Recuperado el 25 de abril de 2019, de <http://www.udg.mx/es/noticia/la-disminucion-del-lago-de-chapala-afecta-hasta-la-region-de-los-altos>
- López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Carranza-Fraser, J. (2007). Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*, 17, 17–30. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v17s1/v17s1a3.pdf>
- López, A., & Pontaza, D. (2017). Cambio climático: 6 fenómenos que afectan a México - TecReview. Recuperado el 20 de julio de 2019, de Tec Review website: <http://tecreview.tec.mx/cambio-climatico-6-fenomenos-que-afectan-a-mexico/>
- LOS MUNICIPIOS Y LOCALIDADES RIBEREÑAS. (s/f). Recuperado el 25 de julio de 2019, de <http://mapas.centrogeo.org.mx/ciberatlas/chapala/lagoyentorno/hombre/municipio.htm>

- Marín, M. (1990). Normalidad y anomalía en la investigación climatológica actual. *Revista de Geografía*, 24, 35–41.
- Marsik, M., Stevens, F. R., & Southworth, J. (2011). Amazon deforestation: Rates and patterns of land cover change and fragmentation in Pando, northern Bolivia, 1986 to 2005. *Progress in Physical Geography*, 35(3), 353–374. <https://doi.org/10.1177/0309133311399492>
- Marteau, R., Richard, Y., Pohl, B., Smith, C. C., & Castel, T. (2014). High-resolution rainfall variability simulated by the WRF RCM: application to eastern France. *Climate Dynamics*, 44(3–4), 1093–1107. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2125-5>
- Mendoza, M. (1998). *Balance de Fósforo en el Lago de Chapala*.
- Meza-Villegas, E. (2010). Déficit del lago de Chapala. *La gaceta*, 6.
- Muradyan, V., Tepanosyan, G., Asmaryan, S., Saghatelyan, A., & Dell'Acqua, F. (2019). Relationships between NDVI and climatic factors in mountain ecosystems: A case study of Armenia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14(April), 158–169. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.03.004>
- N, M., RA, M., CG, M., GAB, da F., & J, K. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(February), 853–858. Recuperado de www.nature.com
- Olivares, R. (2018). Documento México Proceso Regional del 8º Foro Mundial del Agua. *ANEAS*, 8, 1–91. Recuperado de http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2018/03/mexico_8FMA_esp.pdf
- Ordoñez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica: Balance Hídrico Superficial*. 44. Recuperado de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Owe, M., Choudhury, B. J., & Ormsby, J. P. (1989). Large are variability in climate-based soil moisture estimates and implications for remote sensing. *GeoJournal*, 19(2), 177–183. <https://doi.org/10.1007/BF00174647>
- Pedroza-Gutiérrez, C., & Catalán-Romero, J. M. (2017). Evolución histórica y ambiental en

los procesos de transformación del lago Chapala. *Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 9.
<https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd21-40.ehap>

Plan estatal del desarrollo de Jalisco. (2011).

Priego, A., Avalos, H., & Fregoso, A. (2004). La dinámica ambiental de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta Ecológica*, 23–38. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2884358.pdf>

Rivas, I., Güitrón, A., & Montero, M. (2012). Hydrologic vulnerability to climate change of the Lerma-Chapala Basin, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 167, 297–308. <https://doi.org/10.2495/ST110271>

SEMADET. (2006). *Acuerdo de recursos hídricos de la cuenca Lerma Chapala*. 62(1), 27–40.

Silva, A. (2002). Mean air temperature estimation in Mainland Portugal. En *Discussion Papers within the Working Group of the COST 719 WG2 Meeting (restricted)*.

Silwal, S. (2010). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources and Vulnerability in Hills of Nepal. *Strategies*.

The World Commission on Dams | International Rivers. (s/f). Recuperado el 12 de julio de 2019, de <https://www.internationalrivers.org/campaigns/the-world-commission-on-dams>

Uscinski, J. E., Douglas, K., & Lewandowsky, S. (2017). *Climate Change Conspiracy Theories* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.328>

Villanueva, J., Cerano, J., Benavides, J. de D., Stahle, D., Estrada, J., Constante, V., & Tostado, M. (2010). Reconstrucción de los niveles del lago de Chapala con series dendrocronológicas de *Texodium mucronatum*. *Revista Mexicana Científica*, 3.

Villatoro, M., Hernández, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CISE, y P del fósforo. *Agronomía costarricense*, 32, 12.

Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2017). *A review*

of the potential impacts of climate change on surface water quality A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. 6667(September).
<https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>

Wilhite, D. A. (2005). The role of disaster preparedness in national planning with specific reference to droughts. En *Natural Disasters and Extreme Events in Agriculture: Impacts and Mitigation*. https://doi.org/10.1007/3-540-28307-2_2

Yan, Z. W., Li, Z., & Xia, J. J. (2014). Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes. *Science China Earth Sciences*, 57(12), 2891–2900.
<https://doi.org/10.1007/s11430-014-4945-x>

Yang, X., & Lo, C. P. (2002). Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *International Journal of Remote Sensing*, 23(9), 1775–1798. <https://doi.org/10.1080/01431160110075802>

Zhang, X. (2013). Climate Change Indices. Recuperado de
<http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>

Zhang, X., & Feng, Y. (2004). *Manual del Usuario*. 1–22.