



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE BIOLOGÍA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS
ECOLOGÍA Y CONSERVACIÓN

**Análisis multitemporal de los lagos de
Michoacán mediante teledetección**

Tesis

Que presenta

Biól. Claudia Daniela González Araujo

Como requisito para obtener el grado de

Maestra en Ciencias Biológicas

Asesor

Dr. Juan Manuel Ortega Rodríguez

Morelia, Michoacán. Agosto 2021.



Agradecimientos

Siempre estaré agradecida con mis papás Salvador y Rocío, ya que ellos me dieron la motivación para estudiar, a mi hermana Zahira, que cuando estaba estresada por cuestiones artísticas que hay en la carrera me ayudaba a que se vieran mucho mejor.

Mis abuelos Vidal y Enedina, que nunca dejaron de motivarme, para que lograra culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco el gran apoyo que desde mi servicio social tuve del doctor Juan Manuel Ortega Rodríguez y a mis compañeros del laboratorio, en especial a Ángel que estuvo en mis momentos más cruciales.

En esta nueva etapa encontré a los doctores más dedicados, gracias por hacer este proyecto mejor Alejandro Salinas Melgoza, José Arnulfo Blanco García, Ricardo Miguel Pérez Munguía y María Alcalá de Jesús.

Al igual que a mis amigos que cada que los necesitaba ahí estaban, Arubi, Gabo, Joaquín, Robert, Luis, Ottmar, Cristopher, Vianney y Rene, como otros grandes amigos que encontré en el camino Randy, Paco y Gabriel Huerta.

Dedicatoria

A mis padres:

Salvador González Sánchez y

Rocío Araujo Sámano

A mi hermana:

Zahira Alejandra

A mi abuelo:

Vidal González Valencia

A todos ustedes les dedico este proyecto con amor.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Importancia de los cuerpos de agua	10
1.2	Lagos de Michoacán	11
1.3	Clima	12
1.4	Cambio climático	13
1.5	SIG y teledetección	14
2	ANTECEDENTES	16
2.1	Aplicación de la teledetección al estudio de cuerpos de agua	16
3	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	19
4	OBJETIVOS	20
4.1	General	20
4.2	Específicos	20
5	CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	21
5.1	Cuitzeo	22
5.2	Pátzcuaro	24
5.3	Zirahuén	26
6	MATERIALES Y MÉTODOS	28
6.1	Procesamiento de imágenes	29
6.2	Cambio en el área de la superficie de los lagos	29
6.3	Temperatura superficial	30
6.4	Balance hídrico en cuencas	30
6.5	Cobertura forestal	32
7	RESULTADOS	34
7.1	Superficies	34
7.1.1	Cuitzeo	36
7.1.2	Pátzcuaro	39
7.1.3	Zirahuén	43
7.2	Temperatura	46
7.3	Balance hídrico	50

7.3.1	Evapotranspiración de referencia (ET ₀)	50
7.3.2	Índice de aridez (AI).....	53
7.4	Cobertura forestal.....	56
8	DISCUSIÓN	62
9	CONCLUSIÓN	66
10	LITERATURA CITADA	69

Índice de figuras

Figura 1 Localización de los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén.....	21
Figura 2 Subcuenca lago de Cuitzeo	22
Figura 3 Lago de Cuitzeo.....	22
Figura 4 Subcuenca lago de Pátzcuaro	24
Figura 5 Lago de Pátzcuaro.....	24
Figura 6 Subcuenca lago de Zirahuén	26
Figura 7 Lago de Zirahuén.....	27
Figura 8 Diagrama de flujo de la metodología.....	28
Figura 9 Superficies del lago de Cuitzeo (1993-2019).....	36
Figura 10 Superficies promedio del lago de Cuitzeo (1993-2019).....	37
Figura 11 Superficie mínima del lago de Cuitzeo (1998) para la misión Landsat 5	38
Figura 12 Superficie máxima del lago de Cuitzeo (2005) para la misión Landsat 7.....	39
Figura 13 Superficies del lago de Pátzcuaro (1993-2019).....	40
Figura 14 Superficies promedio del lago de Pátzcuaro (1993-2019).....	41
Figura 15 Superficie máxima del lago de Pátzcuaro (1995) para la misión Landsat 5.....	42
Figura 16 Superficie mínima del lago de Pátzcuaro (2006) para la misión Landsat 7	42
Figura 17 Superficies del lago de Zirahuén (1993-2019).....	43
Figura 18 Superficies promedio del lago de Zirahuén (1993-2019).....	44
Figura 19 Superficie mínima del lago de Zirahuén (1993) para la misión Landsat 5	45
Figura 20 Superficie máxima del lago de Zirahuén (2004) para la misión Landsat 7.....	46
Figura 21 Temperatura del agua del lago de Cuitzeo (1993-2019), bandas 6, 6A y 10.....	47
Figura 22 Temperatura del agua del lago de Cuitzeo (1993-2019), bandas 6, 6B y 11	47
Figura 23 Temperatura del agua del lago de Pátzcuaro (1993-2019), bandas 6, 6A y 10	48
Figura 24 Temperatura del agua del lago de Pátzcuaro (1993-2019), bandas 6, 6B y 11	48
Figura 25 Temperatura del agua del lago de Zirahuén (1993-2019), bandas 6, 6A y 10.....	49
Figura 26 Temperatura del agua del lago de Zirahuén (1993-2019), bandas 6, 6B y 11	49
Figura 27 Evapotranspiración de la cuenca de Cuitzeo (1970-2000)	50
Figura 28 Evapotranspiración de la cuenca de Pátzcuaro (1970-2000)	51
Figura 29 Evapotranspiración de la cuenca de Zirahuén (1970-2000)	52
Figura 30 Índice de aridez en la cuenca de Cuitzeo (1970-2000)	54
Figura 31 Índice de aridez en la cuenca de Pátzcuaro (1970-2000).....	54
Figura 32 Índice de aridez en la cuenca de Zirahuén (1970-2000).....	55
Figura 33 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Cuitzeo (2000-2015).....	57
Figura 34 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Cuitzeo (2000-2015).....	57
Figura 35 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Pátzcuaro (2000-2015) ...	58
Figura 36 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Pátzcuaro (2000-2015).....	59
Figura 37 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Zirahuén (2000-2015)	60
Figura 38 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Zirahuén	61

Índice de cuadros

Cuadro 1 Características de Landsat 5, 7 y 8. Elaborado por INEGI y USGS (2018).....	17
Cuadro 2 Total de imágenes para cada lago	34
Cuadro 4 Comparativo de superficie del espejo de agua	66
Cuadro 5 Comparativo de temperatura, ET0 y AI	68

Resumen

Los lagos son de vital importancia, pues ayudan a regular el clima, además son el hábitat de flora y fauna, los lagos más importantes para Michoacán, en términos biológicos y económicos, son los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. El siguiente estudio pretende identificar la dinámica de los cuerpos de agua, estudiar los cambios en un periodo de tiempo establecido mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica, para entender su relación con las fluctuaciones de temperatura, evapotranspiración, aridez y cobertura forestal dentro de la cuenca, a partir de las imágenes recopiladas del periodo de 1993-2019, la tendencia para Cuitzeo y Pátzcuaro es desfavorable, en cambio, Zirahuén presenta un crecimiento estable de superficie con un aumento de temperatura inferior al que presentan los otros dos lagos, Cuitzeo tiene una evapotranspiración mayor, mientras que Pátzcuaro presenta el mayor índice de aridez, la cobertura forestal se encuentra en aumento en las tres cuencas por actividad humana; analizando las tendencias y datos obtenidos se demuestra que los lagos cumplen con sus ciclos hidrológicos de manera natural, pero la actividad humana propicia la aceleración y degradación más intensa dentro de los sistemas lacustres.

Lagos, fluctuaciones, sistemas de información geográfica, teledetección, ciclos hidrológicos.

Abstract

The lakes are of vital value, since they help regulate the weather, they're also the habitat of flora and fauna, the most important lakes in "Michoacán" in biological and economical terms are "Cuitzeo", "Pátzcuaro" and "Zirahuén". The next study aims to identify the dynamic of the water bodies, looking at the changes made in a set period of time by means of tele-detection and geographic information systems tools, to understand the relation with the fluctuations in temperature, evapotranspiration, aridity and forest cover in the basin, from the images collected from the period 1993-2019, the tendency for "Cuitzeo" and "Pátzcuaro" it's unfavorable, however, "Zirahuén" presents an stable increase of surface with an increase in temperature inferior tan the other two lakes, "Cuitzeo" has a greater evapotranspiration, while "Pátzcuaro" presents the highest aridity, the forest cover it's on a rise in the three basins by human activity, analyzing the tendencies and data obtained, it's proven that the lakes meet the hydrologic cycles in a natural manner, bur the human activity favors the acceleration and degradation more intensely in the lacustrine systems.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua son importantes ya que dependemos de ellos para los sistemas de riego, la ganadería, la industria, la pesca y la agricultura (Ruíz *et al.*, 2010), este estudio se enfoca en los lagos. Los lagos contribuyen a regular el clima, son el hábitat de especies animales y vegetales, y benefician a la economía de los habitantes que realizan la pesca y la agricultura (Bravo *et al.*, 2008).

Los ecosistemas acuáticos son particularmente vulnerables al cambio ambiental y muchos están, en la actualidad, severamente degradados. Irónicamente, esta vulnerabilidad hace que estos ecosistemas sean buenos centinelas e integradores del cambio ambiental en escalas que van desde lo local (por ejemplo, extinciones de especies endémicas) a lo global (por ejemplo, el cambio climático). Los peces de agua dulce se encuentran entre los grupos de animales más amenazados del planeta y las tasas de disminución de la biodiversidad son más altas para el agua dulce que para los organismos terrestres o marinos. Incluso algunos de los lagos y arroyos alpinos más prístinos, que proporcionan suministros de agua potable para gran parte del mundo, están amenazados (Williamson *et al.*, 2008).

En muchos sentidos, los ecosistemas lacustres sirven como indicadores, ya sea directa o indirectamente a través de la influencia del clima en la cuenca. Específicamente, es probable que los lagos sirvan como buenos centinelas para el cambio climático actual porque (1) estos ecosistemas están bien definidos y se

estudian de manera sostenida; (2) los lagos responden directamente al cambio climático y también incorporan los efectos de los cambios climáticos que ocurren dentro de la cuenca; (3) estos integran respuestas a lo largo del tiempo, que pueden filtrar el ruido aleatorio; y (4) los lagos se distribuyen en todo el mundo y, como tales, pueden actuar como centinelas en muchas ubicaciones geográficas y regiones climáticas diferentes, capturando diferentes aspectos del cambio climático (Adrian, *et al.*, 2009).

1.2 Lagos de Michoacán

La topografía de México es esencial para la existencia de grandes y numerosos cuerpos de agua, se estima que existen 70 lagos, sus extensiones varían entre mil y diez mil hectáreas, los lagos más grandes del país son: el lago de Chapala en Jalisco, el lago de Cuitzeo y el de Pátzcuaro en Michoacán (CONABIO, 2003).

Michoacán presenta tres tipos de lagos de acuerdo con su formación:

- Lagos tectónicos: Se les nombra de esta manera, ya que sus cuencas se formaron a partir de fallas, se localizan en la parte norte del Estado y son el Lago de Cuitzeo, la Laguna de Zacapu y el Lago de Chapala.
- Lagos vulcano-tectónicos: Se forman a partir de lava y depósitos de materiales no compactados, además de fallas geológicas, estos son el Lago de Pátzcuaro y el Lago de Zirahuén.
- Lagos cratéricos: Estos se destacan por formarse en las depresiones en las cimas de los volcanes, ejemplos de estos son La Alberca de Zacapu, La Alberca de Teremendo y La Alberca de Tacámbaro, también al norte de

Michoacán se encuentran los lagos llamados “las Siete Luminarias” (Israde, 2005).

Los más importantes para Michoacán, en términos biológicos y económicos, son los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén (Madrigal *et al.*, 2004; INEGI, 2017).

1.3 Clima

La variabilidad interanual de la temperatura y la precipitación en diversos sistemas acuáticos del hemisferio norte está influenciada por masas de aire que se originan en el Océano Pacífico, el Ártico y el Golfo de México. Además, la variabilidad climática a escalas decenales, centenarias y milenarias parece verse afectada por cambios en los vínculos atmósfera-océano, como la Oscilación Decenal del Pacífico, El Niño, la Oscilación del Sur y la Oscilación del Atlántico Norte, sistemas que influyen en la ocurrencia de sequías e inundaciones. En general, se piensa que estos mecanismos de forzamiento a escala continental sincronizan la variación en las propiedades físicas y químicas de los lagos dentro de regiones más pequeñas. Sin embargo, existe un creciente reconocimiento de que la variación en la posición del lago dentro de los paisajes hidrológicos locales puede producir diversas respuestas de los lagos a los eventos climáticos regionales, por ejemplo, “El niño” y “La niña”. Así mismo, investigaciones recientes sugieren que los cambios en el uso regional de la tierra, especialmente el desarrollo agrícola y la urbanización, pueden alterar u ocultar la respuesta del lago a la variabilidad climática (Pham *et al.*, 2008).

Lamentablemente, hasta la fecha, pocos estudios han cuantificado cómo varía la sensibilidad de los lagos al clima, el uso de la tierra y sus interacciones en función de la posición geográfica de los lagos, por ejemplo, los lagos en Cuatrociénegas que se localizan al interior de un desierto, en comparación con el lago de Catemaco a 300 m sobre el nivel del mar aproximadamente, es decir, ambos están expuestos a sus diferentes condiciones, o cómo cambian estas relaciones a través del tiempo. En las cuencas endorreicas (sin salida de superficie visible), estos cambios disminuyen el volumen del lago y conducen a una mayor concentración iónica en las aguas superficiales. De manera similar, los cambios en la precipitación pueden aumentar o disminuir la salinidad y el volumen del agua del lago, dependiendo de la estacionalidad de la precipitación (verano, invierno) y el grado en que el agua ingresa directamente al lago, desde el flujo superficial o a través del agua subterránea. Debido a estas vías múltiples, muchas de las cuales varían en función de las características de la cuenca, la cuantificación de los efectos precisos de los eventos climáticos en los lagos a menudo se beneficia del uso comparativo de balances de masas (Adrian *et al.*, 2009).

1.4 Cambio climático

El cambio climático se define como una alteración del clima causado directa o indirectamente por el hombre. Los fenómenos climáticos varían como la temperatura, patrones de precipitación, nubosidad y los fenómenos antropogénicos que causan esa variación son las emisiones de los aerosoles a la atmósfera, aumento de las emisiones de CO₂, gas metano e hidratos de metano (Yepez, 2011 y Díaz, 2012).

Actualmente, el cambio climático se considera una de las amenazas más graves para los ecosistemas de todo el mundo. Monitorear y comprender los efectos de este plantea desafíos, debido a la multitud de respuestas dentro de un ecosistema y la variación espacial dentro del paisaje. Un importante cuerpo de investigación demuestra la sensibilidad de los lagos al clima y muestra que las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos responden rápidamente a los cambios relacionados con el clima. Los rápidos tiempos de rotación de las escalas de organismos a ecosistemas en los lagos son un requisito previo para detectar cambios tan rápidos.

Algunas señales relacionadas con el clima son altamente visibles y fácilmente medibles en los lagos. Por ejemplo, las fluctuaciones en el nivel del agua provocadas por el clima se han observado a gran escala, pero otras señales pueden ser más complejas y difíciles de detectar en los lagos, pero pueden ser indicadores igualmente sensibles del forzamiento radiativo o igualmente informativos sobre los efectos en los servicios del ecosistema.

1.5 SIG y teledetección

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas que permiten generar análisis y presentar resultados en formas interactivas, tales como mapas (Gopar-Merino, 2016)

Por su parte la teledetección nos proporciona imágenes satelitales en formato digital que pueden ser tratadas mediante técnicas de procesamiento digital, para obtener información de ellas (Corrales y Ochoa, 2017), en su conjunto con los SIG se pueden

estimar variables como: temperatura superficial, temperatura del aire, evapotranspiración, transparencia del agua, concentración de fitoplancton, materia suspendida total, concentración de amonio, floraciones de cianobacterias y macrófitas (Sánchez, 2002; Cúnsulo *et al.*, 2012; Markogianni *et al.*, 2018).

La justificación de este trabajo radica en identificar la dinámica de los cuerpos de agua estudiar los cambios en un periodo de tiempo establecido, mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica, para entender su relación con las fluctuaciones de temperatura, evapotranspiración, aridez y cobertura forestal dentro de la cuenca. Los ecosistemas lacustres son complejos, tienen muchos procesos internos y la influencia de la cuenca puede variar según la ubicación geográfica, el clima regional y el uso de la tierra.

2 ANTECEDENTES

La temperatura global se ha incrementado en el siglo XX, entre 0.2 y 0.6 °C desde 1861. Para México existen reportes de la temperatura media anual y se ha incrementado 0.6 °C en promedio, pero para los últimos 10 años el incremento ha sido de 0.7 °C, hasta julio del 2008 (Pereyra *et al.*, 2011).

Vekerdy y Mendoza (2010) realizaron un análisis del comportamiento del espejo de agua sobre el lago de Cuitzeo tomando como base una serie de imágenes satelitales de la misión Landsat para cuatro años, donde lograron señalar para el año de 1994 la máxima superficie del lago con 350 km² y la menor con 250 km² en el año 1986, a falta de un estudio batimétrico en general del lago se apoyaron de la medición diaria de la Comisión Nacional del Agua para obtener el nivel más alto de agua en el lago (1,820.3 msnm), combinando los datos obtenidos concluyen que a niveles bajos el agua no puede extenderse tan libremente y la variabilidad de la superficie del cuerpo de agua está ligada a comportamientos climáticos de corto y largo plazo.

2.1 Aplicación de la teledetección al estudio de cuerpos de agua

Los satélites Landsat, son los más utilizados para hacer análisis del medio ambiente y del paisaje, también para la extracción y monitoreo de cuerpos de agua puesto que crea una homogeneización de la imagen, creando una clara distinción entre objetos, y mostrando las zonas de transición (Sacristán, 2006 y Xie *et al.*, 2016). El primer proyecto de satélites se denominó Earth Resources Technology Satellites (ERTS) y fue lanzado en 1972, para después nombrarlo Landsat (Martínez y Díaz, 2005). A

continuación, se muestran las características de las imágenes de las misiones 5, 7 y 8 de Landsat (cuadro 1).

Cuadro 1 Características de Landsat 5, 7 y 8. Elaborado por INEGI y USGS (2018)

Misión	Modo Espectral	Espacial	Espectral (micras)		Radiométrica	Temporal
5	Multiespectral	30 m	Banda 1 azul	0.45-0.52	8 bits	16 días
			Banda 2 verde	0.52-0.60		
			Banda 3 roja	0.63-0.69		
			Banda 4 infrarrojo cercano 1	0.76-0.90		
			Banda 5 infrarrojo cercano 2	1.55-1.75		
			Banda 7 infrarrojo medio	2.08-2.35		
Termal	120 m	Banda 6 infrarrojo térmico	10.4-12.5			
7	Pancromática	15 m	Banda 8 pancromática		16 bits	
	Multiespectral	30 m	Banda 1 azul	0.45-0.52		
			Banda 2 verde	0.52-0.60		
			Banda 3 roja	0.63-0.69		
			Banda 4 infrarrojo cercano 1	0.78-0.90		
			Banda 5 infrarrojo cercano 2	1.55-1.75		
Banda 7 infrarrojo medio	2.09-2.35					
8	Pancromática	15 m	Banda 8 pancromática	0.50-0.68	16 bits	
	Infrarrojo térmico	100 m	*Banda 10 infrarrojo térmico	10.60-11.19		
			*Banda 11 infrarrojo térmico	11.50-12.51		
	Multiespectral	30 m	Banda 1 aerosol costero	0.43-0.45		
			Banda 2 azul	0.45-0.51		
			Banda 3 verde	0.53-0.59		
			Banda 4 rojo	0.64-0.67		
			Banda 5 infrarrojo cercano	0.85-0.88		
			Banda 6 SWIR 1	1.57-1.65		
Banda 7 SWIR 2			2.11-2.29			
Banda 9 cirrus	1.36-1.38					

*Las bandas de sensor térmico infrarrojo (TIRS) se adquieren a una resolución de 100 m, pero se vuelven a remuestrear a 30 m.

El acervo de imágenes recopilado desde los años 70's del siglo XX y hasta la actualidad, nos proporcionan la información ambiental necesaria para comparativos históricos de la superficie de los cuerpos de agua, así también de la aparición de vegetación, contaminación, calidad de agua y deforestación en la cuenca.

3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es la tendencia que presentan los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén en el periodo 1993-2019 con respecto a la variabilidad de sus superficies en el mismo periodo?
- ¿La temperatura promedio superficial de los lagos mantiene una relación con la pérdida o aumento de la superficie del espejo de agua?
- ¿La evapotranspiración de cada cuenca está relacionada con las variaciones de la superficie del espejo de agua?
- ¿Cómo se ha modificado la cobertura forestal de las cuencas de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén en el periodo 2000-2015?

4 OBJETIVOS

4.1 General

- Generar un estudio del cambio temporal de algunas propiedades de los principales lagos del estado de Michoacán.

4.2 Específicos

- Evaluar el cambio en la superficie del espejo de agua en los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén.
- Estimar el comportamiento de la temperatura superficial.
- Analizar la evapotranspiración de referencia y aridez.
- Conocer la dinámica de la cobertura forestal en la cuenca de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén.

5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Los sistemas lacustres que se estudiaron en este trabajo son Cuitzeo (figuras 1, 2 y 3) Pátzcuaro (figuras 1, 4 y 5) y Zirahuén (figuras 1, 6 y 7), por su importancia biológica y socioeconómica.

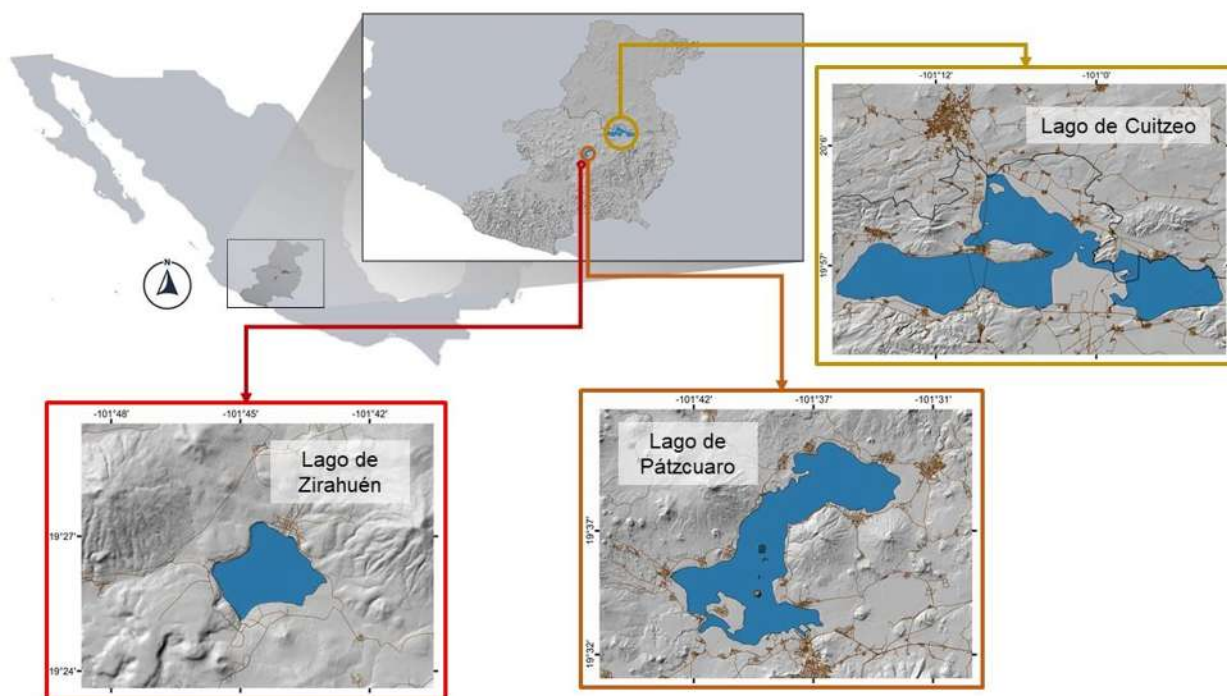


Figura 1 Localización de los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén

5.1 Cuitzeo

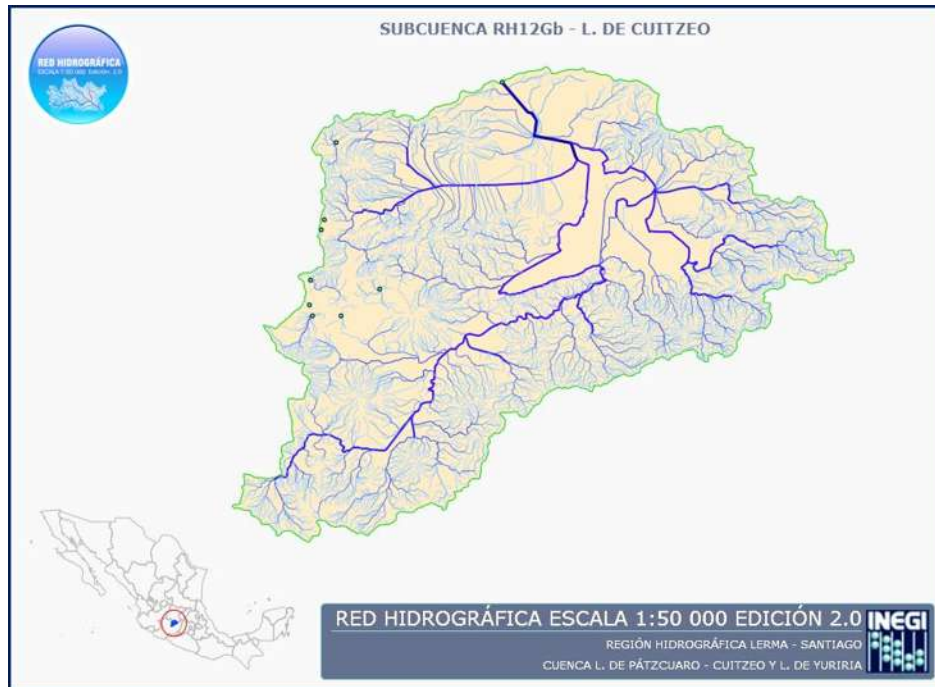


Figura 2 Subcuenca lago de Cuitzeo



Figura 3 Lago de Cuitzeo

La cuenca de Cuitzeo se localiza entre los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato, entre las coordenadas $19^{\circ} 30'$ y $20^{\circ} 05'$ de latitud norte y $100^{\circ} 35'$ y $101^{\circ} 30'$ de longitud oeste, su extensión es de aproximadamente $4,000 \text{ km}^2$, el área del

lago con el mismo nombre es de 400 km², es el segundo lago continental más grande de México (Leal-Nares *et al.*, 2010). Los ríos que desembocan al lago son tres, el río Grande de Morelia, el río Zinapécuaro y el río Queréndaro (Bravo *et al.*, 2008 y Morales, 2010). El clima es cálido Cwo(w)b(i)g, la temperatura media anual mayor de 18 °C (Vidal, 2010). La cuenca forma parte del Sistema Volcánico Transversal y se encuentra en un sistema de fallas geológicas, las cuencas lacustres son el resultado del deslizamiento de subducción del piso del Océano Pacífico y la placa de Cocos, por debajo de la placa norteamericana (Garduño- Monroy e Israde- Alcántara, 2010). Los tipos de suelos que se encuentran en la cuenca de Cuitzeo son: Vertisol pélico, Feozem háplico y lúvico, Luvisol, Gleysol mólico y Solonchak gléyico (Sánchez-Blanco y Guevara-Féfer, 2013). La vegetación más común de la cuenca es: bosque de pino, de encino, mesófilo de montaña, tropical caducifolio, matorral subtropical, bosque espinoso, bosque de galería, pastizal, vegetación acuática y subacuática, plantaciones de eucalipto y/o cultivado (Bocco *et al.*, 2012).

5.2 Pátzcuaro

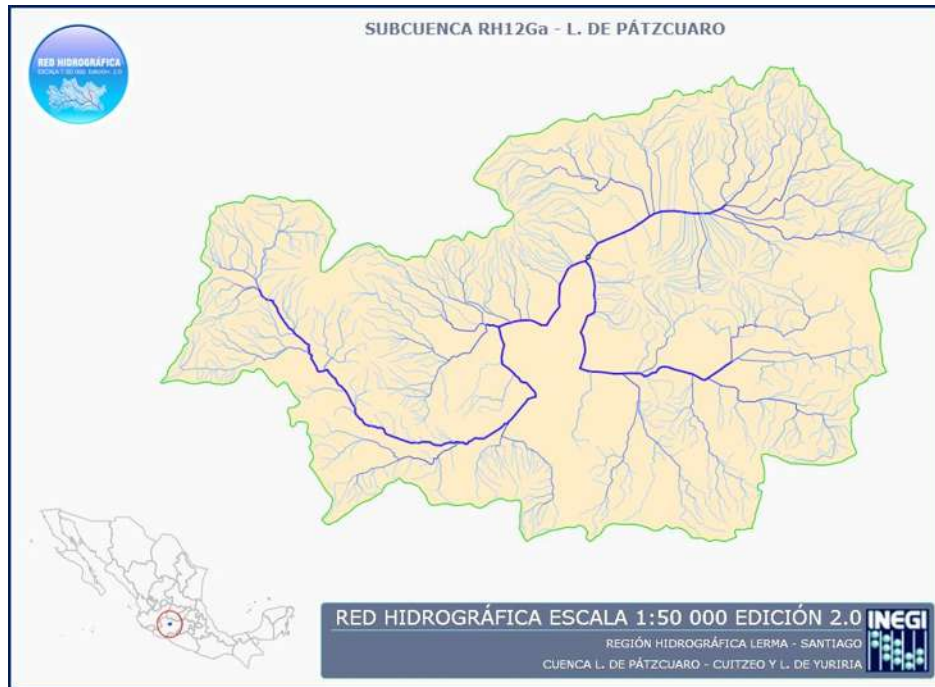


Figura 4 Subcuenca lago de Pátzcuaro



Figura 5 Lago de Pátzcuaro

El lago de Pátzcuaro se encuentra en la cuenca con el mismo nombre, en el centro-norte de estado de Michoacán, con una extensión de 1,149 km², mientras que el lago tiene una extensión de 90.34 km² (Rendón López, 2015) entre las coordenadas 19° 26' y 19° 45' latitud norte y 101° 53', 101° 24' longitud oeste (CONAGUA, 2015). El cuerpo de agua se sitúa a 2036 msnm. El tipo de suelo es mayormente Andosol en las zonas altas y Luvisoles en las laderas (Medina-Orozco *et al.*, 2019). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, la clave climática es C(w²)(w)b(e)g (Medina-Orozco *et al.*, 2014). El escurrimiento de los manantiales Chapultepec y la Alberca abastecen al lago (Huerto, 2014), aunque también los ríos San Bartolo, Quiroga, Santa Fe, el Guani. La vegetación que se encuentra en la cuenca es de bosque de coníferas, bosque de encinos, vegetación secundaria, pastizales y áreas de cultivo (Rendón, 2015).

5.3 Zirahuén

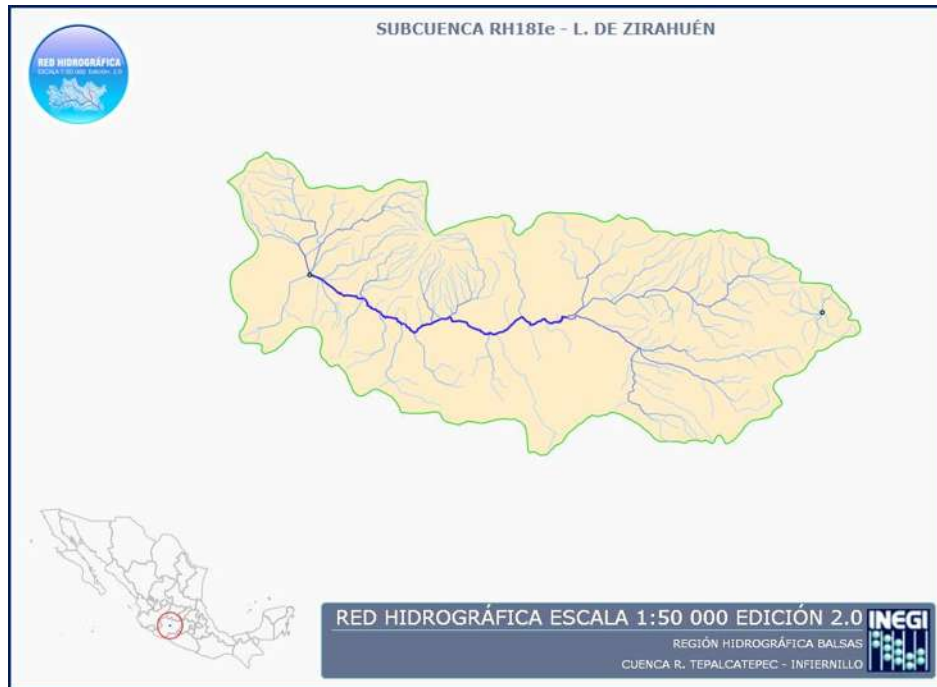


Figura 6 Subcuenca lago de Zirahuén



Figura 7 Lago de Zirahuén

La cuenca de Zirahuén se ubica en la parte central del estado de Michoacán, entre las coordenadas 19° 21' 14" y 19° 29' 32" de latitud norte y 101° 30' 33" y 101° 46' 15" longitud oeste con una superficie de 273.07 km², el cuerpo de agua se localiza en la región oeste de la cuenca a 2,075 msnm, y se extiende 10.48 km² (Ríos *et al.*, 2018). Es un lago monomíctico y pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal. Los suelos presentes son: Andosol húmico, Luvisol crómico y Fluvisol eutrítico (Gómez-Tagle, Gómez-Tagle, 2010). Los tipos de rocas que se encuentran en la cuenca en su mayoría son basaltos y andesitas. El clima es templado con lluvias en verano su clasificación es Cw(w₂)(w)_i, el río que desemboca en el lago de Zirahuén es el río la Palma o el Silencio. La vegetación principal de la cuenca es el bosque de coníferas, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña, pastizal y vegetación acuática (Madrigal *et al.*, 2004).

6 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica de la Facultad de Biología, donde se cuenta con el equipo de cómputo y la base de datos de imágenes satelitales que se utilizaron.

Las imágenes satelitales corresponden a las obtenidas por el programa de satélites LANDSAT en sus misiones 5, 7 y 8. Estas abarcan un periodo temporal que va desde el año 1985 hasta la actualidad, mientras que el periodo de tiempo del estudio fu de 1993 al 2019. Como mapa base se tomó la cartografía de INEGI 1994, para expresar los porcentajes de fluctuación de la superficie (figura 8).

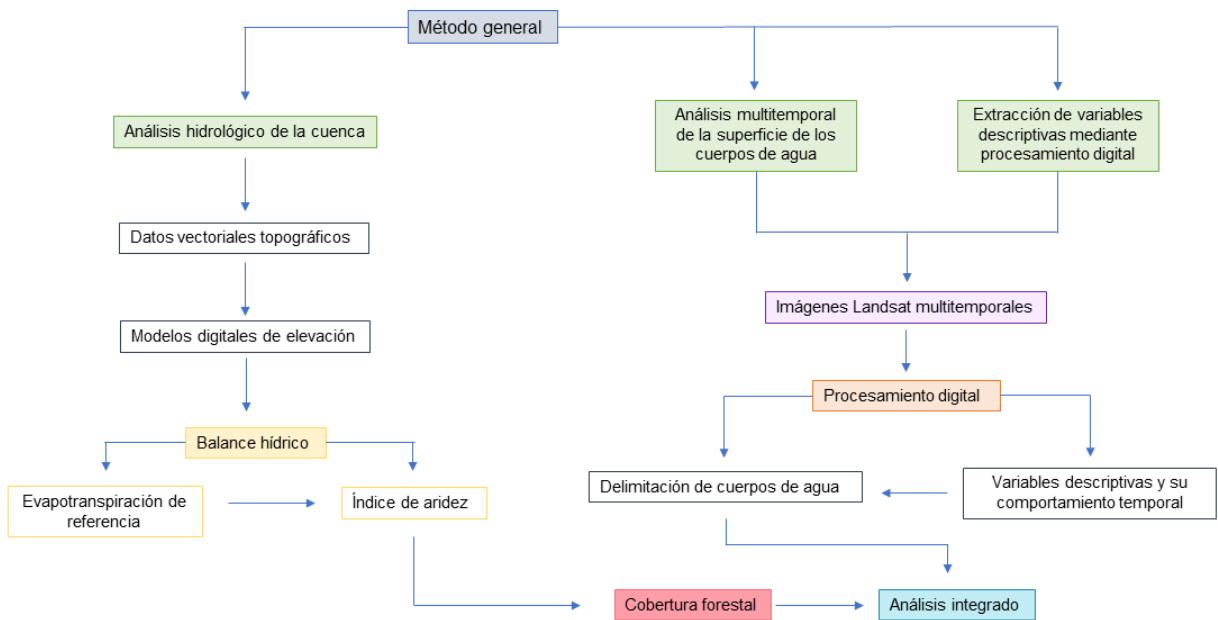


Figura 8 Diagrama de flujo de la metodología

6.1 Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes se realizo mediante un sistema de información geográfica (Qgis, Idrisi Selva, ArcGis), de acuerdo con las siguientes etapas:

- Corrección atmosférica de las escenas seleccionadas

Las imágenes satélites presentan distorsiones provocadas por la interferencia de la atmosfera, para eliminarlas se debe realizar un método denominado “Dark Object Subtraction”, el método considera la bruma sobre todo en los cuerpos de agua donde estos presentan agua limpia, calma y profunda, donde deben representar reflectancia nula. La operación es abrir el archivo heather de la imagen satelital y cargar las bandas 4, 3 y 2 (RGB), se establece la región de interés (ROI) en cuerpos de agua con las características descritas anteriormente (Cúnsulo *et al.*, 2012).

- Mejoramiento espacial de las escenas en las que se cuente con banda pancromática (pansharpening).

6.2 Cambio en el área de la superficie de los lagos

Los algoritmos de extracción de agua para imágenes satelitales se dividen en cuatro tipos: 1) clasificación temática, con métodos supervisados y no supervisados, 2) desmezcla espectral, 3) umbrales de banda única y 4) métodos del índice espectral del agua. El método no supervisado y el índice de agua espectral son los más utilizados de estos cuatro, ya que son de bajo costo y no se necesita de gran conocimiento para su aplicación. A pesar de esto, se han obtenido resultados favorables (Xie *et al.*, 2016). Para estimar la superficie de los cuerpos de agua se

realizó una interpretación visual de cada lago y para cada una de las fechas obtenidas del año 1993 al 2019 con CartaLinx, para así obtener la extensión del cuerpo de agua. Una vez obtenidas las superficies de cada fecha del espejo de agua se generaron líneas de tendencia para entender la dinámica de sus fluctuaciones.

6.3 Temperatura superficial

Para calcular la temperatura superficial terrestre (LST, por sus siglas en inglés) se utilizaron las bandas 10 y 11 (infrarrojo térmico) para la misión de Landsat 8, las bandas 6A y 6B para Landsat 7 y por último para Landsat 5 la banda 6. Se realizó un análisis en QGIS de “estadísticas de zona”, para ello necesitamos el ráster y se seleccionaron las bandas antes mencionadas para cada misión y el vector correspondiente. Las estadísticas por calcular fueron siete: conteo, temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, intervalo y varianza.

6.4 Balance hídrico en cuencas

El balance hídrico (BH) es un “presupuesto hidrológico”. En este se hace un análisis del agua que entra, que se almacena o sale de una cuenca (Castillo e Inoñán, 2018). Se basa utilizando los cálculos de equilibrio de Thornthwaite y Mather. Para hacer el cálculo en SIG, se toma la distribución espacial de precipitación pluvial, evapotranspiración, temperatura y características del suelo (Torrice, 2011).

La evapotranspiración se define como la cantidad de agua que regresa a la atmosfera ya sea por evaporación directa de agua o cuerpos de agua y la transpiración de las plantas, es la principal variable para poder actuar y tomar decisiones para el manejo de agua. En la década de los 40's se venían realizando

estudios para encontrar la manera de estimarla, la más conocida es la de Penman 1948, que combina la radiación y la potencia de la evaporación de la atmosfera. Mientras que en 1975 la FAO sugirió usar el termino evapotranspiración de referencia (ET₀) para determinar la demanda de agua por efecto del cambio climático global; la combinación de estos modelos Penman-FAO es considerado un modelo más preciso y fiable, es por este motivo que lo consideramos para tener una parte del BH (Amador *et al.*, 2011; Chávez-Ramírez *et al.*, 2013; Waldo *et-al.*, 2015; Sun *et al.*, 2020 y Sutariya *et al.*, 2021). Las imágenes de evapotranspiración que se utilizaron fueron promedios anuales del periodo 1970-2000. El conjunto de datos que consideramos para el análisis de evapotranspiración de referencia fue obtenido por Trabucco y Zomer (2018), con el apoyo del CGIAR-CSI (financiamiento del Proyecto IFPRI No. 203008.000.002 515-01-01).

La aridez es un sinónimo de sequía o sequedad, se puede notar en la ausencia de agua, pero también en la humedad del aire y suelo. Hay varios factores que la originan: escasez de precipitaciones, alta radiación solar, descenso de escorrentía superficial, incremento de temperatura, aumento de las frecuencias y magnitud de la sequía. La diferencia entre sequía y aridez radica principalmente en la temporalidad, ya que el primero es disminución del valor normal de la precipitación para un cierto periodo, y el segundo es una condición climática permanente. El índice de aridez describe las condiciones secas y húmedas de un sitio, ha sido uno de los factores climáticos más utilizados en estudios del cambio climático global y directamente ligado a la evapotranspiración, y obteniendo los datos de índice de aridez en

conjunto con la evapotranspiración obtenemos el balance hídrico. (Meng *et al.*, 2004; Mercado-Macera *et al.*, 2010 y Halifa-Marín *et al.* 2018). Las imágenes utilizadas para índice de aridez abarcan un periodo de 1970-2000 y son promedios anuales. El conjunto de datos que consideramos para el análisis de índice de aridez (AI) fueron obtenidos por Trabucco y Zomer (2018), con el apoyo del CGIAR-CSI (financiamiento del Proyecto IFPRI No. 203008.000.002 515-01-01).

El índice de aridez revela el efecto de la evapotranspiración en relación con las precipitaciones en la región. En este caso las cuencas, lo que muestra el índice de aridez es conocer que tan húmedo es el sitio, es decir, el valor 1 indica que es igual la entrada y salida, están en equilibrio, si es mayor de 1 hay mayores condiciones de humedad y cuando se aproxima al 0 la humedad disponible disminuye.

6.5 Cobertura forestal

Es esencial conocer el cambio de cobertura forestal, para así comprender las causas y comportamiento del cambio climático; los cambios en la cobertura forestal afectan varios ciclos como el agua, la energía y carbono, entre otros nutrientes. Existen varias instituciones que tienen sus evaluaciones del cambio de cobertura forestal, hasta ahora las resoluciones de los satélites Landsat son las principales para detectar cambios a gran escala, especialmente los cambios por factores antropogénicos.

Se descargaron las coberturas forestales de 4 años, 2000, 2005, 2010 y 2015, con una resolución de 30 m, otro dato a destacar de este análisis es que también podemos extraer datos de la dinámica de todos los cuerpos de agua que se

encuentran en las 3 cuencas estudiadas. Las coberturas forestales que utilizamos fueron obtenidas de Global Land Cover Facility (Sexton *et al.*, 2016).

7 RESULTADOS

7.1 Superficies

El estudio de las variaciones en superficies de los principales lagos de Michoacán puede ser monitoreado y evaluado a partir de las imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (Mendoza, 2007), teniendo como resultado la tendencia a la disminución de la superficie del lago de Cuitzeo, principalmente por variación de las precipitaciones y la temperatura, dejando como factor menos trascendente la actividad humana. De esta manera se puede observar a través de las imágenes satelitales la dinámica del cuerpo de agua.

Las imágenes recopiladas abarcan un periodo del año 1993 al 2019 (26 años), y en total son 493 imágenes para los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén (cuadro 2).

Cuadro 2 Total de imágenes para cada lago

Lagos	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Cuitzeo	52	73	39
Pátzcuaro	54	69	37
Zirahuén	59	72	38

Lagos	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Cuitzeo	52	73	39
Pátzcuaro	54	69	37
Zirahuén	59	72	38

Para el lago de Cuitzeo se obtuvieron 832 GB de imágenes y para los lagos de Zirahuén y Pátzcuaro 744 GB para cada lago, en total se recopilaron 1,576 GB de imágenes satelitales.

7.1.1 Cuitzeo

El total de imágenes digitalizadas para el lago de Cuitzeo es de 164, para las tres misiones de Landsat.

En el caso de la superficie del lago de Cuitzeo se observa la disminución paulatina de la misma, obteniendo las siguientes variaciones que van desde una mínima de 56.81 km² (14.20%) y la máxima de 350.48 km² (87.62%) (figura 9).

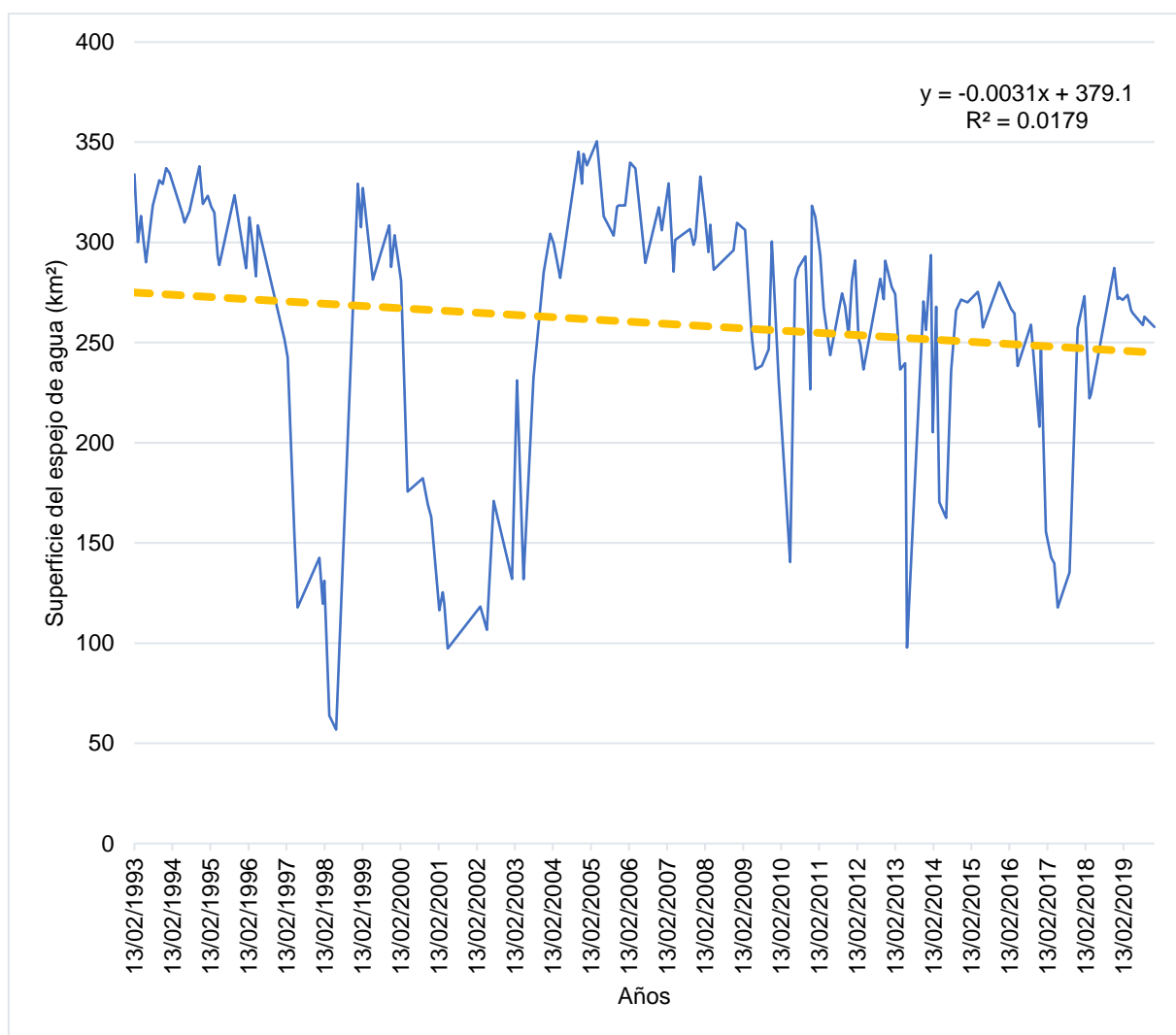


Figura 9 Superficies del lago de Cuitzeo (1993-2019)

Los promedios de la superficie reflejan la mayor variabilidad, de donde se obtiene un mínimo es de 114.7 km² (28.67%) y corresponde al año 2001, el máximo es de 323.6 km² (80.9%) y concierne al año 2005 (figura 10).

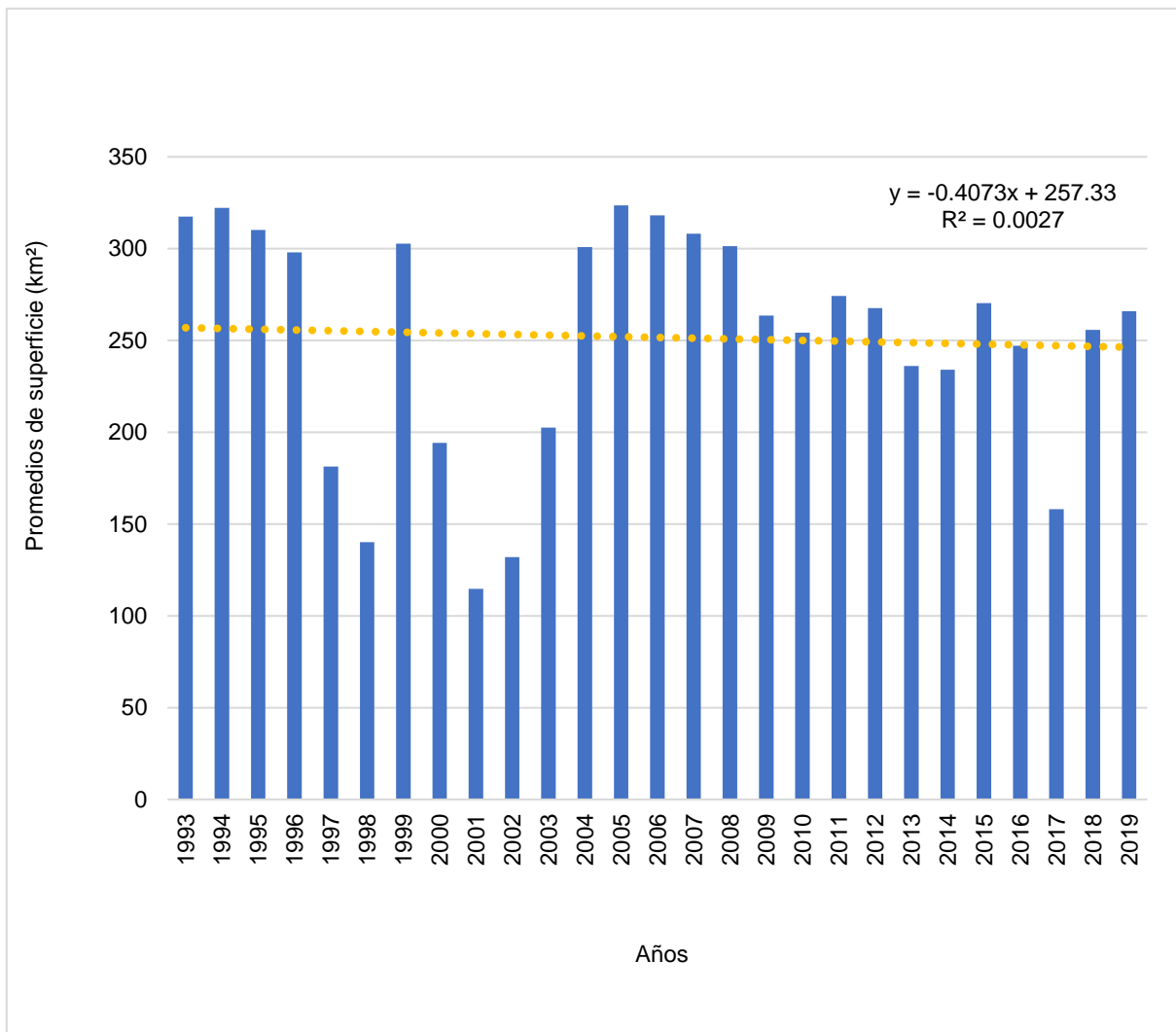


Figura 10 Superficies promedio del lago de Cuitzeo (1993-2019)

La superficie mínima para el lago de Cuitzeo es de 56.8 km² (14.2%) y la máxima de 350.4 km² (87.6%), representada en forma de mapa (figuras 11 y 12).

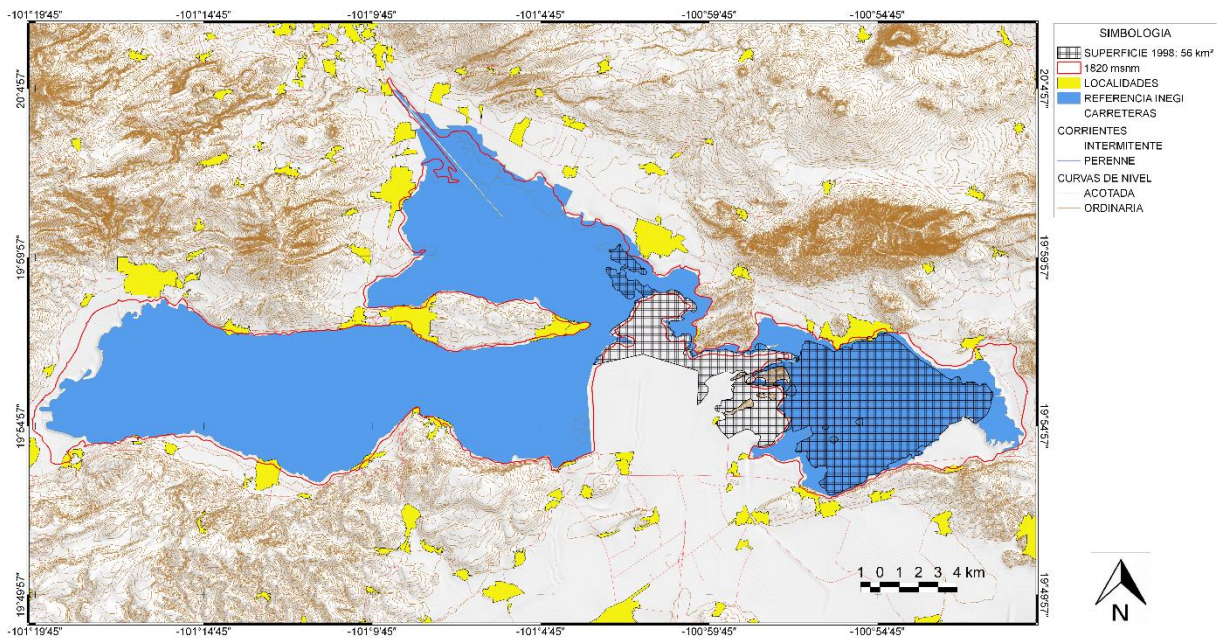


Figura 11 Superficie mínima del lago de Cuitzeo (1998) para la misión Landsat 5

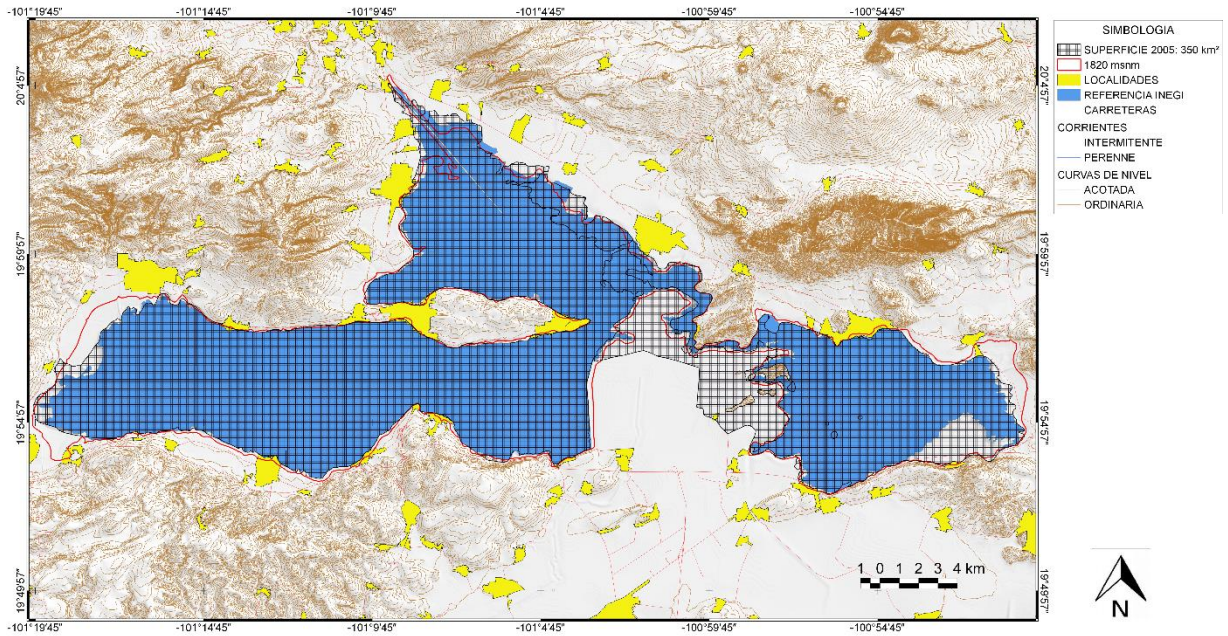


Figura 12 Superficie máxima del lago de Cuitzeo (2005) para la misión Landsat 7

7.1.2 Pátzcuaro

Las imágenes digitalizadas para el lago de Pátzcuaro dan un total de 160 imágenes.

La superficie del lago de Pátzcuaro se observa una fuerte tendencia a la disminución, la superficie mínima es de 67.58 km² (74.80%) y la máxima de 85.77 km² (94.94%) (figura 13).

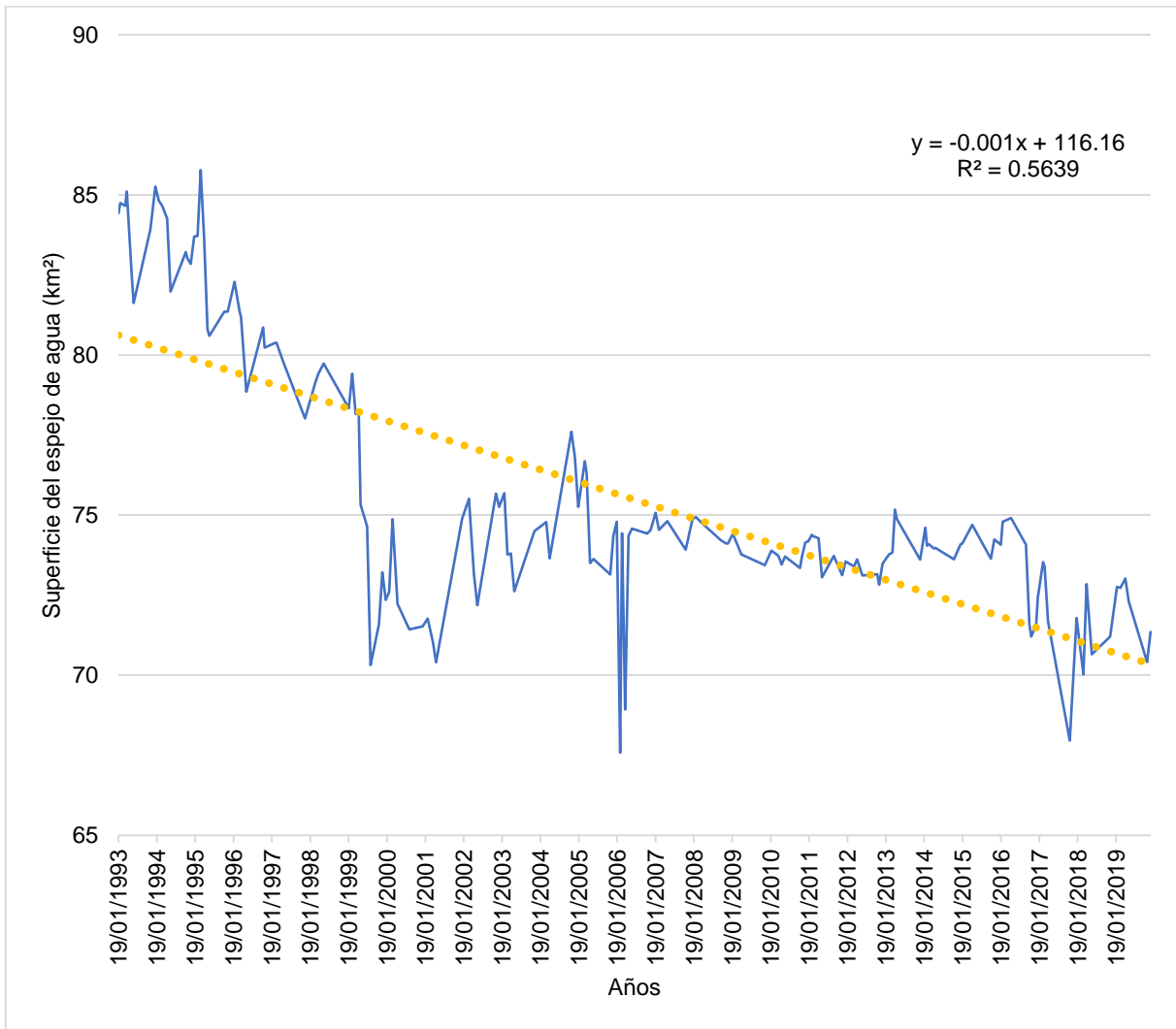


Figura 13 Superficies del lago de Pátzcuaro (1993-2019)

Los promedios de la superficie van a la baja, el mínimo es de 71.06 km² (78.65%) y corresponde al año 2001, el máximo es de 83.75 km² (92.7%) y concierne al año 1994 (figura 14).

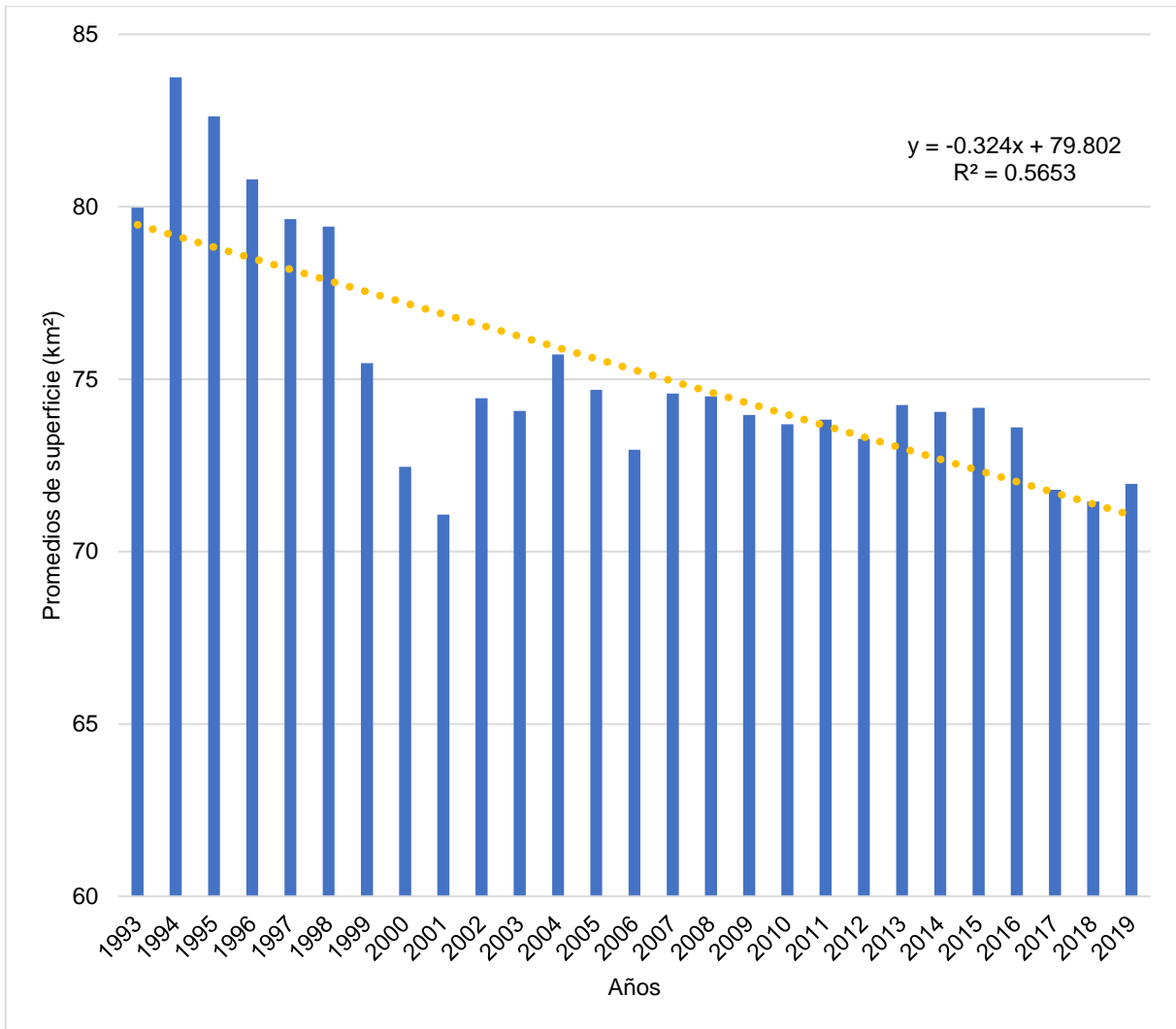


Figura 14 Superficies promedio del lago de Pátzcuaro (1993-2019)

La superficie mínima para la misión es de 67.58 km² (74.71%) y la máxima de 85.77 km² (94.86%) (figura 15 y 16).

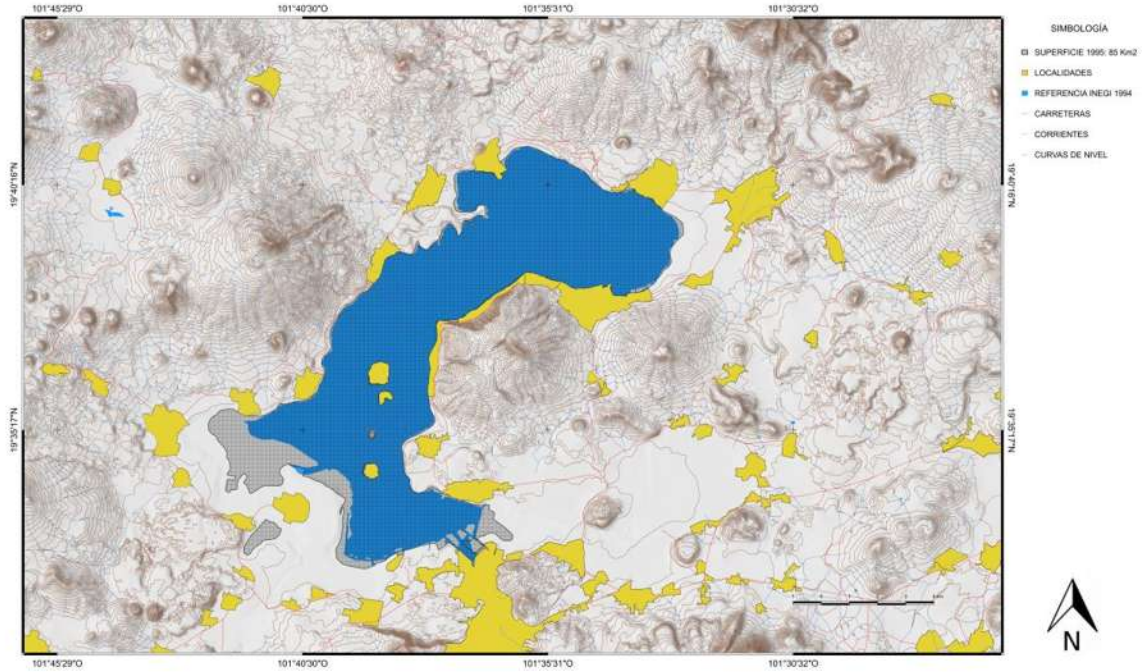


Figura 15 Superficie máxima del lago de Pátzcuaro (1995) para la misión Landsat 5

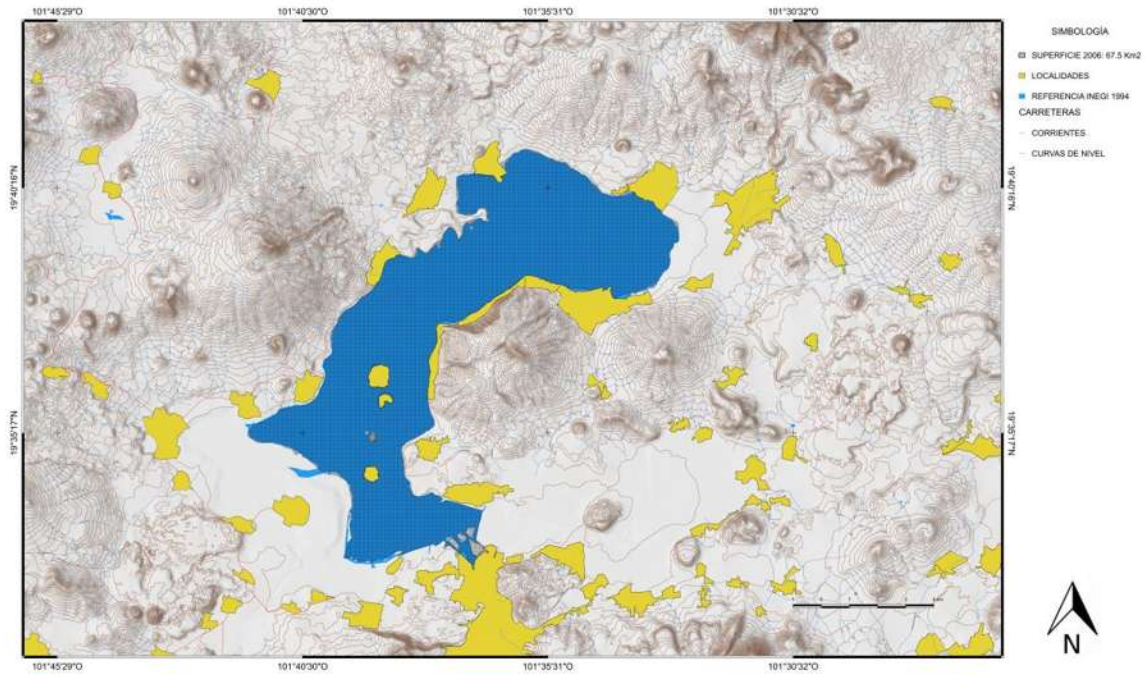


Figura 16 Superficie mínima del lago de Pátzcuaro (2006) para la misión Landsat 7

7.1.3 Zirahuén

Para el lago de Zirahuén se digitalizaron 169 imágenes.

La superficie del lago de Zirahuén se muestra una tendencia de incremento más estable, la superficie mínima es de 8.49 km² (81.01%) y la máxima de 9.56 km² (92.22%) (figura 17).

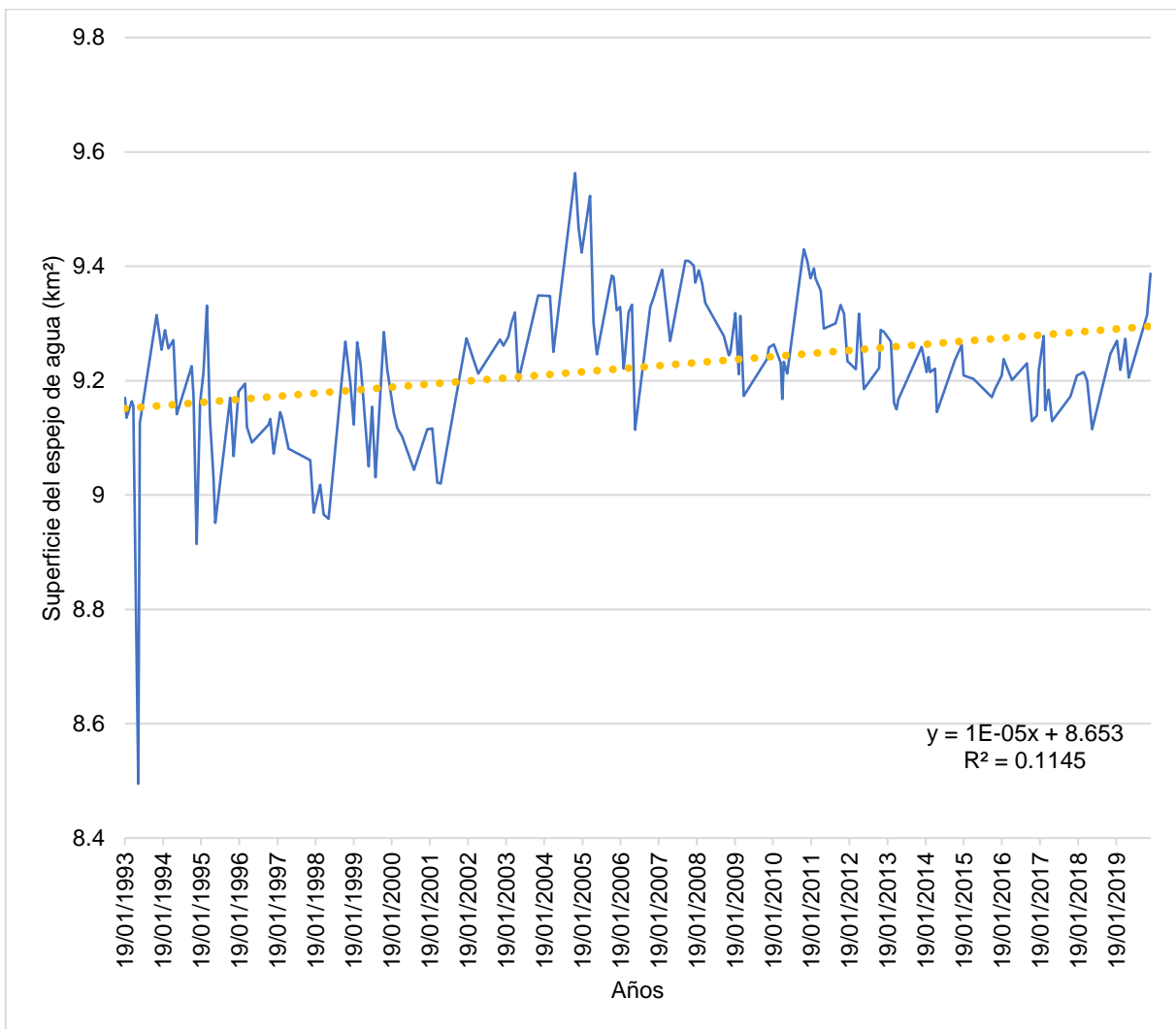


Figura 17 Superficies del lago de Zirahuén (1993-2019)

Los promedios de la superficie son más constantes, el mínimo es de 9.05 km² (86.35%) y corresponde al año 2001, el máximo es de 9.4 km² (89.69%) y concierne al año 2004 (figura 18).

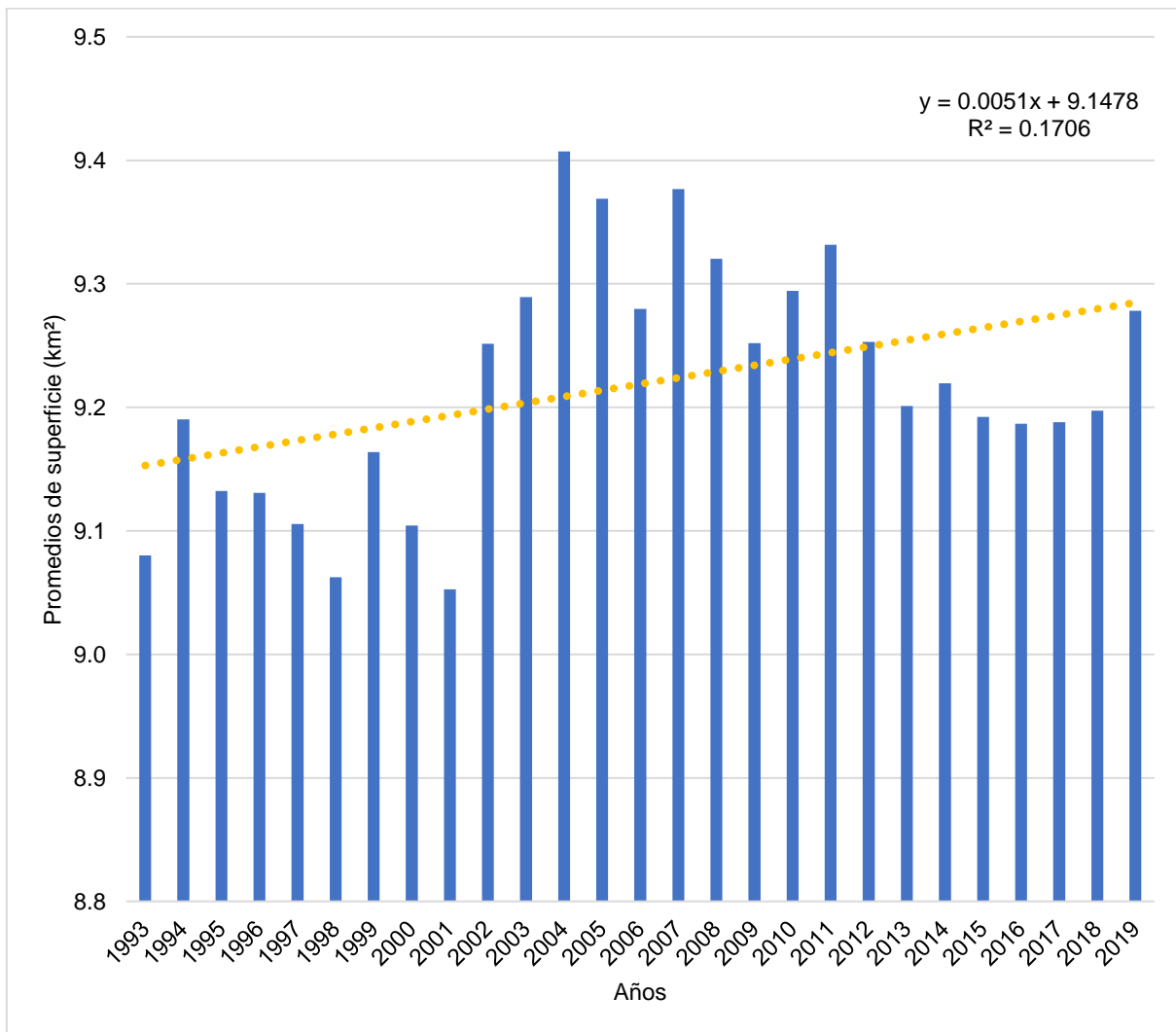


Figura 18 Superficies promedio del lago de Zirahuén (1993-2019)

La superficie mínima para la misión Landsat 5 es de 8.49 km² (81.01%) y la máxima de 9.56 km² (91.22%) (figuras 19 y 20).

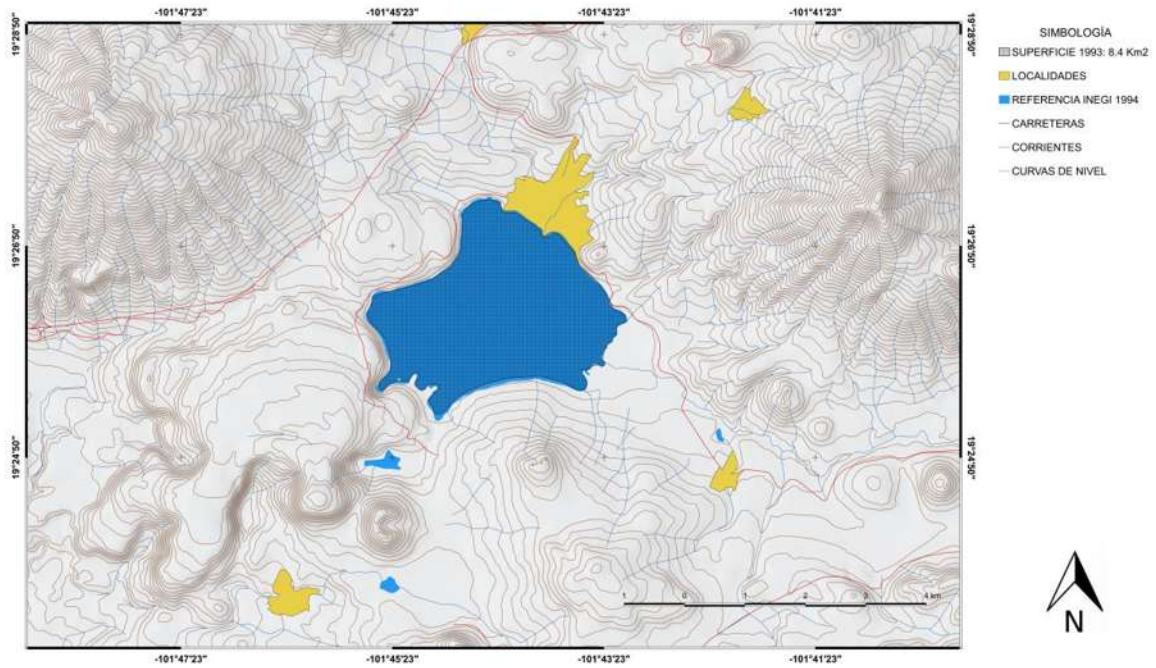


Figura 19 Superficie mínima del lago de Zirahuén (1993) para la misión Landsat 5

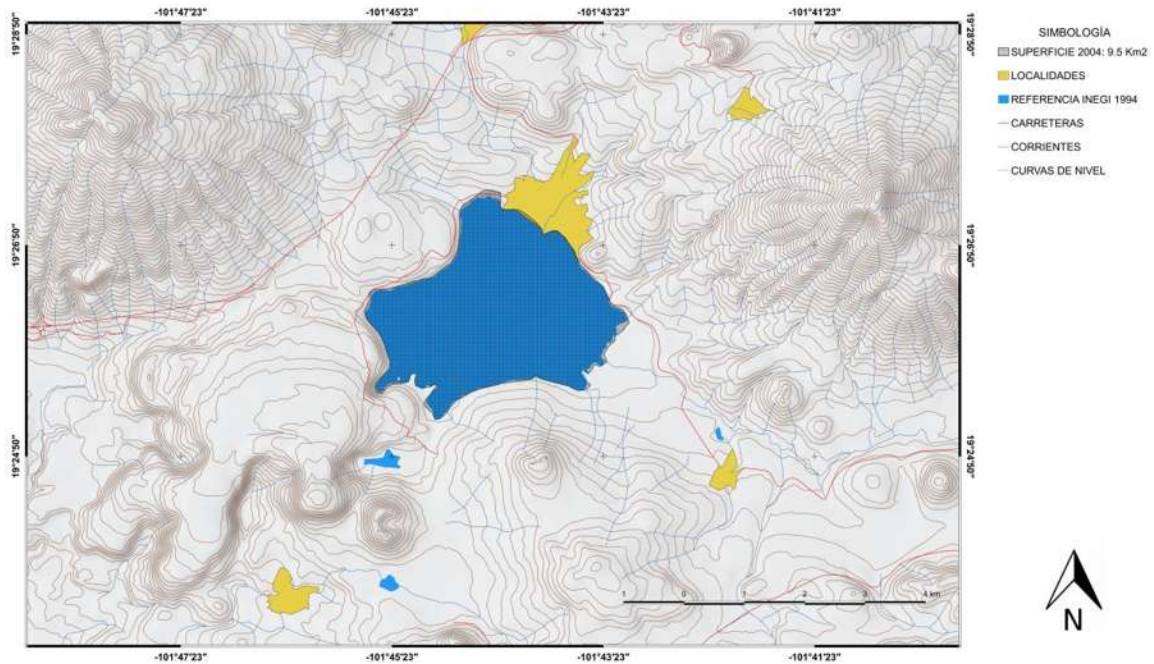


Figura 20 Superficie máxima del lago de Zirahuén (2004) para la misión Landsat 7

7.2 Temperatura

La temperatura media del agua en el lago de Cuitzeo es de 18.84 °C, se observa una tendencia al aumento, desde 1993 al 2019 la temperatura ha incrementado aproximadamente 5 °C lo observamos en la línea de tendencia (figuras 21 y 22).

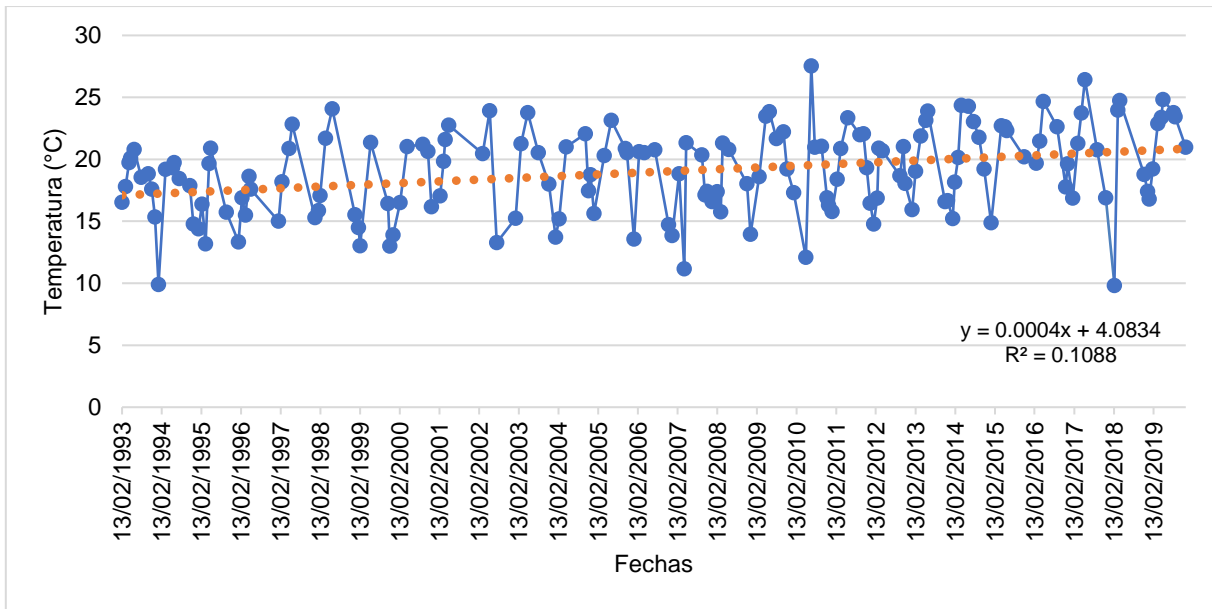


Figura 21 Temperatura del agua del lago de Cuitzeo (1993-2019), bandas 6, 6A y 10

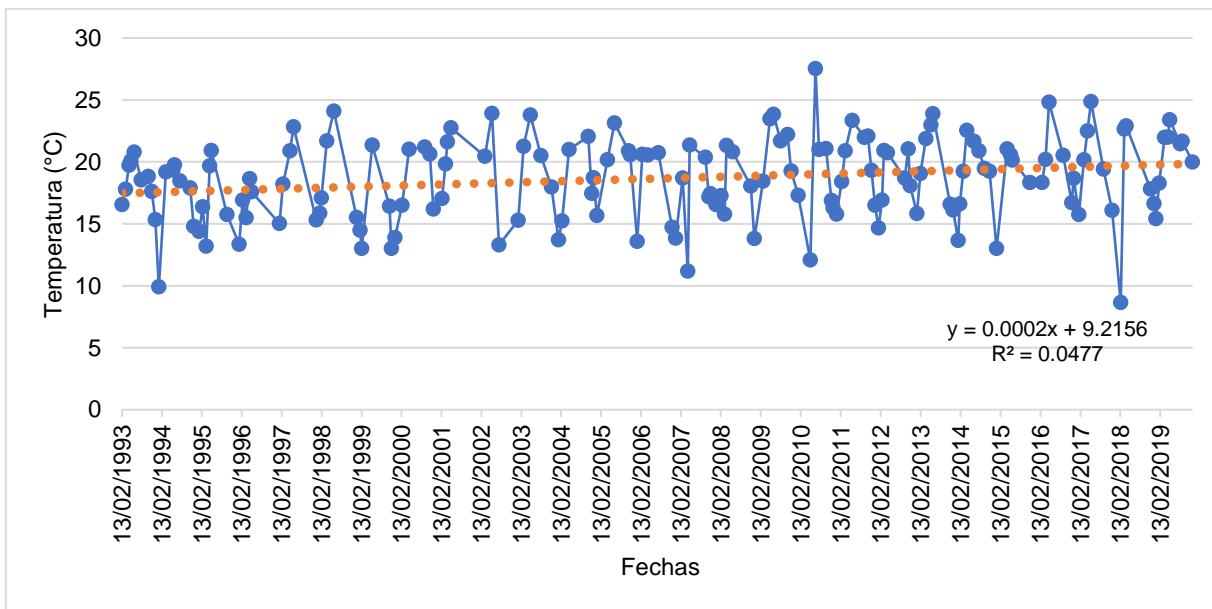


Figura 22 Temperatura del agua del lago de Cuitzeo (1993-2019), bandas 6, 6B y 11

La temperatura media del agua en el lago de Pátzcuaro se encuentra en los 16.94°C, también se observa una tendencia al aumento de temperatura, esta ha aumentado aproximadamente 3 °C se observa en la línea de tendencia (figuras 23 y 24).

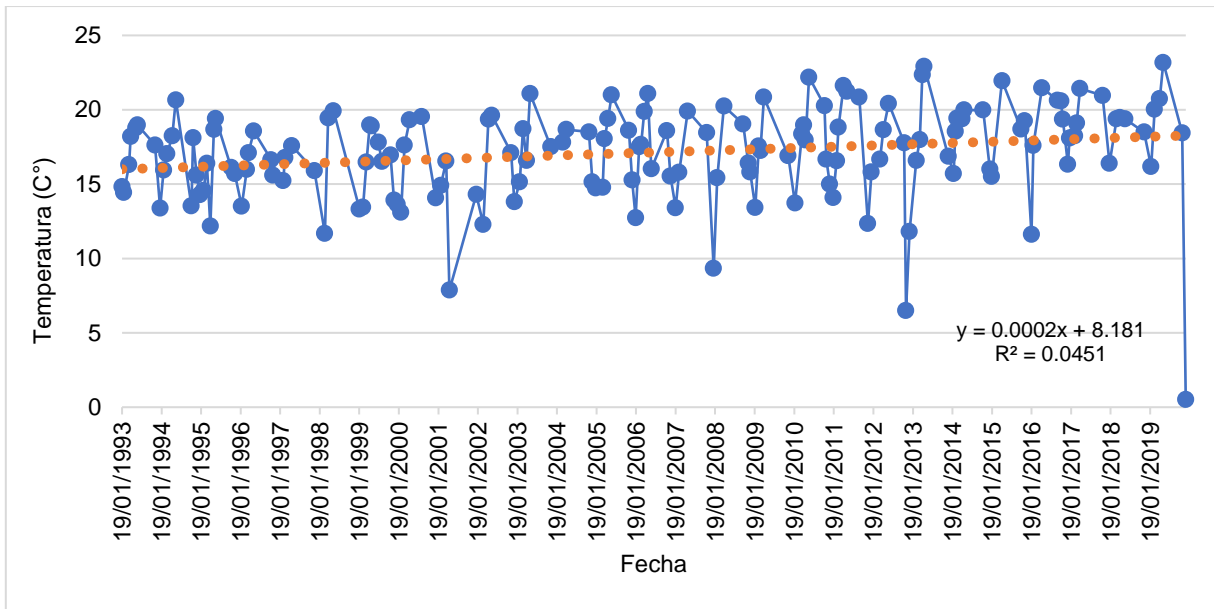


Figura 23 Temperatura del agua del lago de Pátzcuaro (1993-2019), bandas 6, 6A y 10

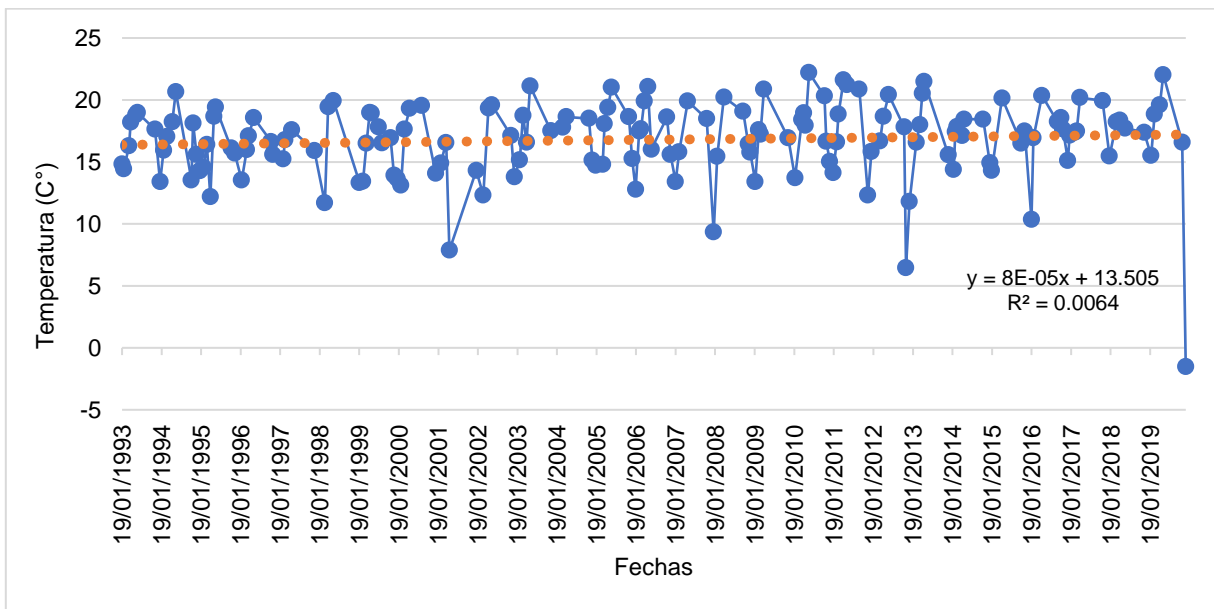


Figura 24 Temperatura del agua del lago de Pátzcuaro (1993-2019), bandas 6, 6B y 11

La temperatura media del agua en el lago de Zirahuén es de 16.67 °C, este cuerpo de agua presenta un incremento de temperatura, al igual que Cuitzeo y Pátzcuaro,

de aproximadamente 2 °C para este lago, lo identificamos en la línea de tendencia (figuras 25 y 26).

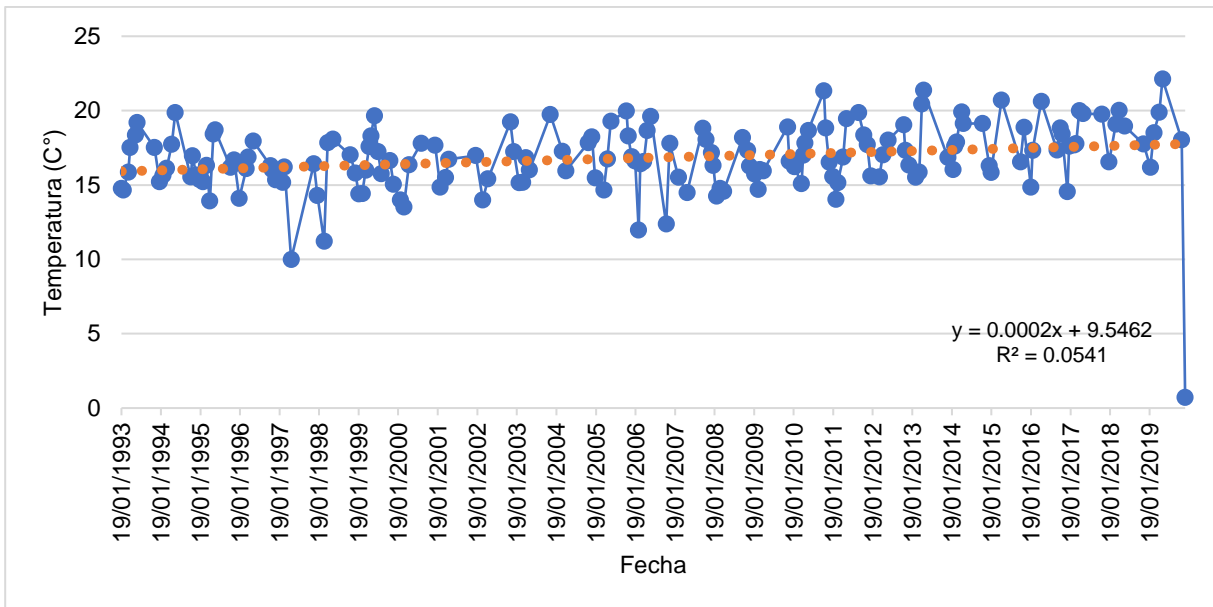


Figura 25 Temperatura del agua del lago de Zirahuén (1993-2019), bandas 6, 6A y 10

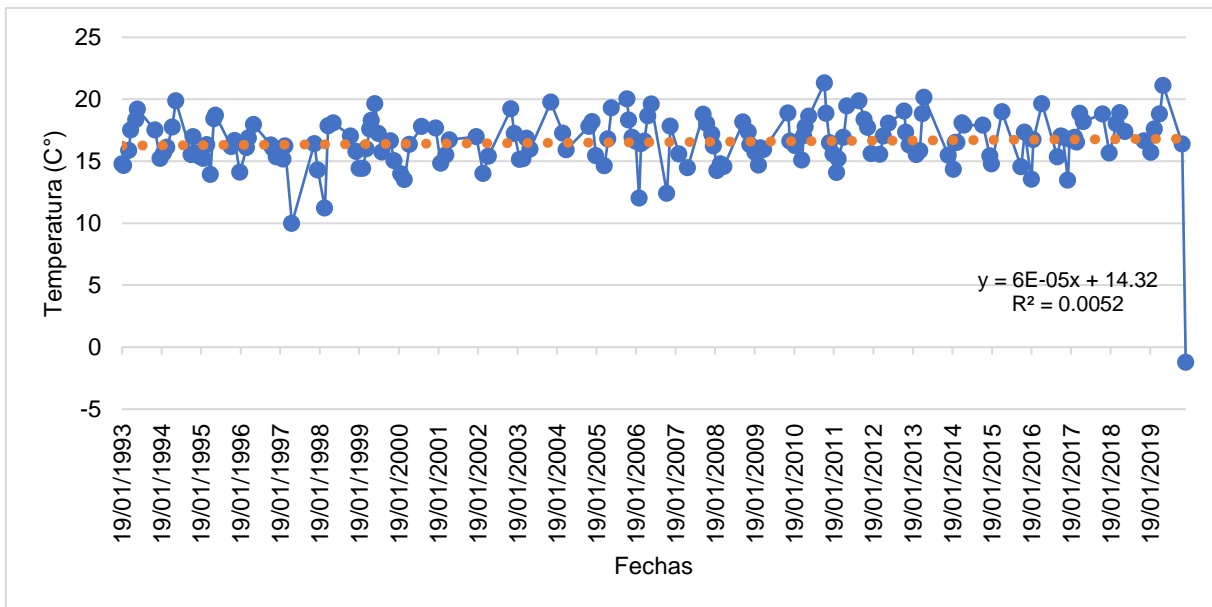


Figura 26 Temperatura del agua del lago de Zirahuén (1993-2019), bandas 6, 6B y 11

7.3 Balance hídrico

7.3.1 Evapotranspiración de referencia (ET0)

En la cuenca de Cuitzeo se observa que la evapotranspiración oscila en una mediana de los 1768 a 1800 mm de agua que se pierde en la cuenca (figura 27). Mientras que se observa una menor evapotranspiración para la cuenca de Pátzcuaro de 1769 a 1794 mm relacionado a la altitud con respecto al nivel del mar (figura 28), continuando con la cuenca de Zirahuén es la que tiene el menor rango que va de los 1704 a los 1797 mm de agua que abandona la cuenca (figura 29).

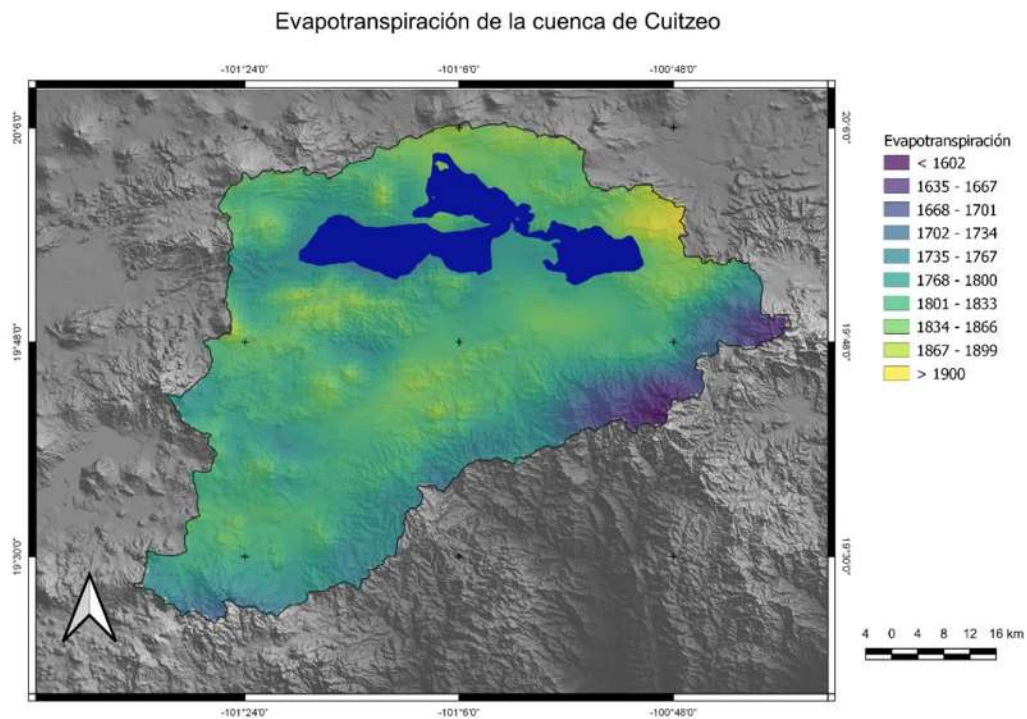


Figura 27 Evapotranspiración de la cuenca de Cuitzeo (1970-2000)

Evapotranspiración de la cuenca de Pátzcuaro

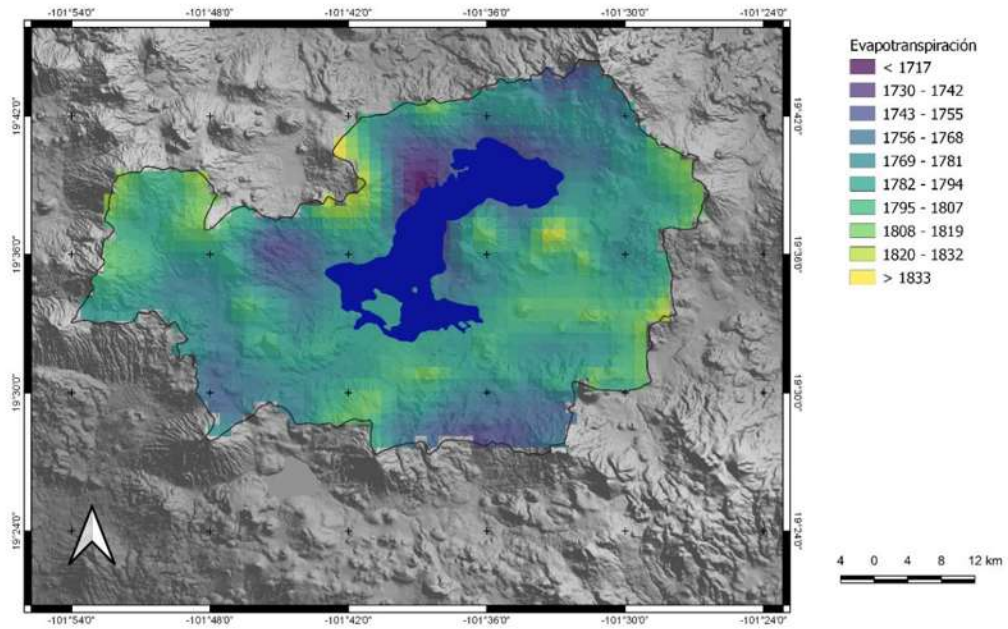


Figura 28 Evapotranspiración de la cuenca de Pátzcuaro (1970-2000)

Evapotranspiración de la cuenca de Zirahuén

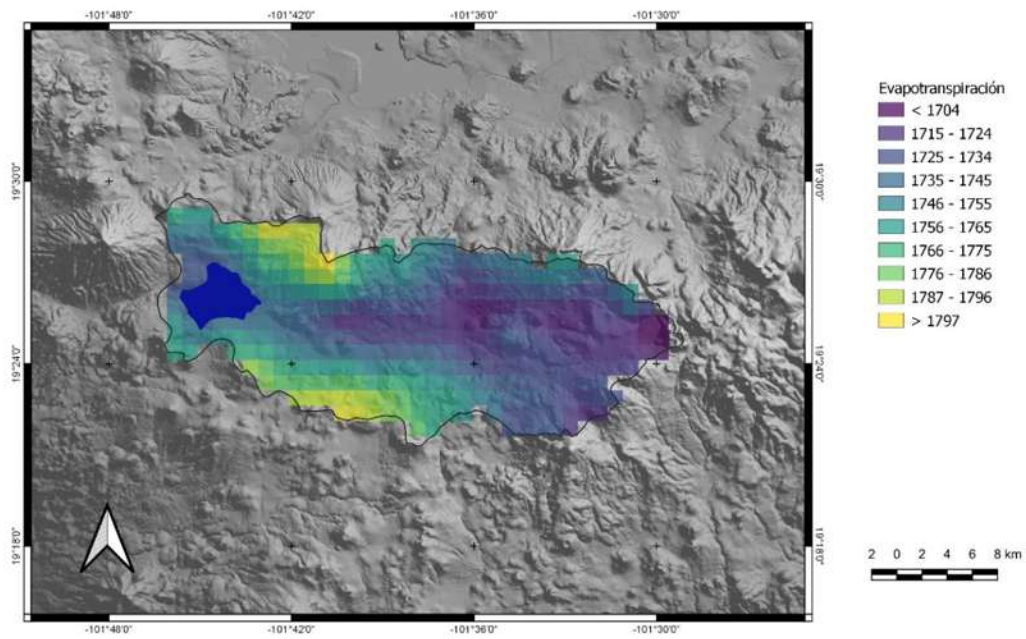


Figura 29 Evapotranspiración de la cuenca de Zirahuén (1970-2000)

7.3.2 Índice de aridez (AI)

El índice de aridez revela el efecto de la evapotranspiración en relación con las precipitaciones en la región, este caso las cuencas, lo que muestra el índice de aridez es conocer que tan húmedo es el sitio.

El índice de aridez promedio para la cuenca de Cuitzeo es de 0.594 (figura 30) quiere decir que la humedad disminuye, para la cuenca de Pátzcuaro el promedio es de 0.536 (figura 31) sucede lo mismo que en Cuitzeo, y en el caso de la cuenca de Zirahuén el promedio es de 0.625 (figura 32) entonces resulta ser la menos árida. Si observamos los mapas podremos identificar que donde se encuentran los lagos son las zonas más áridas, sobre todo al norte de cada cuenca, tomando en cuenta que las zonas menos áridas de cada cuenca son las formaciones montañosas dada su altura mantienen la humedad reflejando un menor índice de aridez.

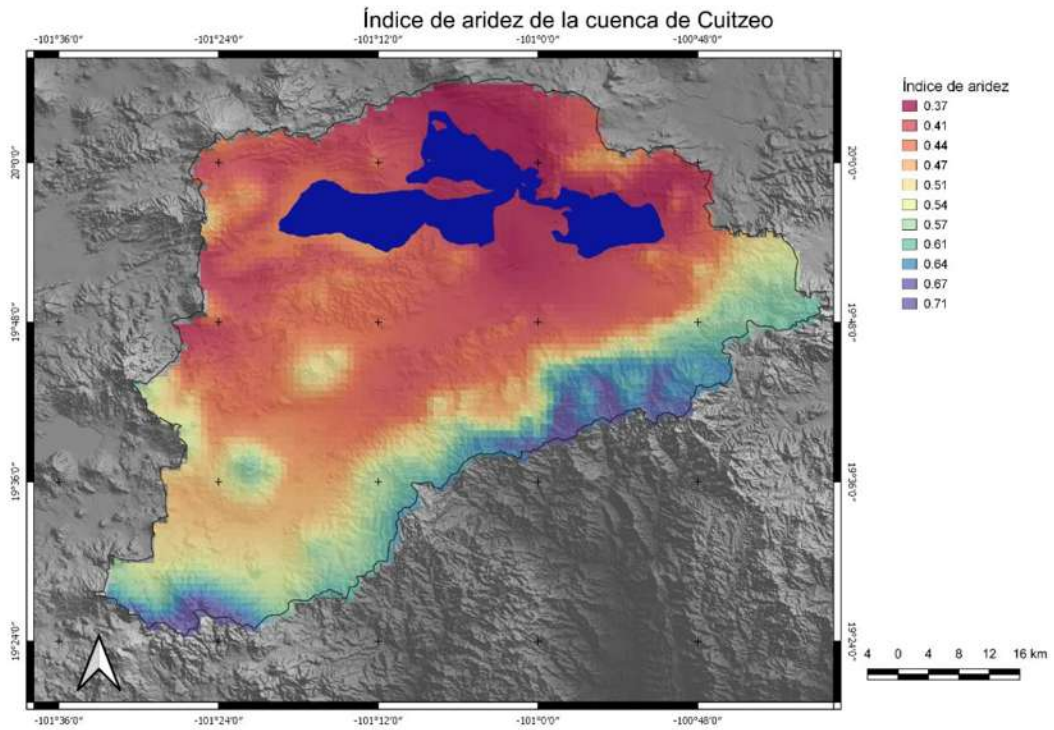


Figura 30 Índice de aridez en la cuenca de Cuitzeo (1970-2000)

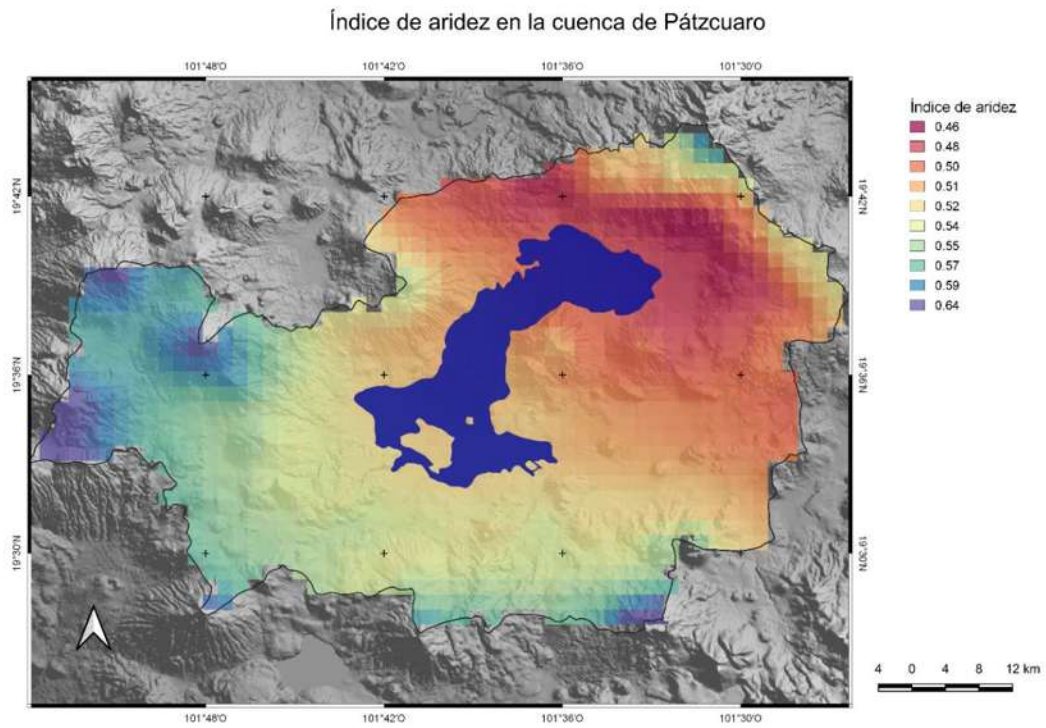


Figura 31 Índice de aridez en la cuenca de Pátzcuaro (1970-2000)

Índice de aridez de la cuenca de Zirahuén

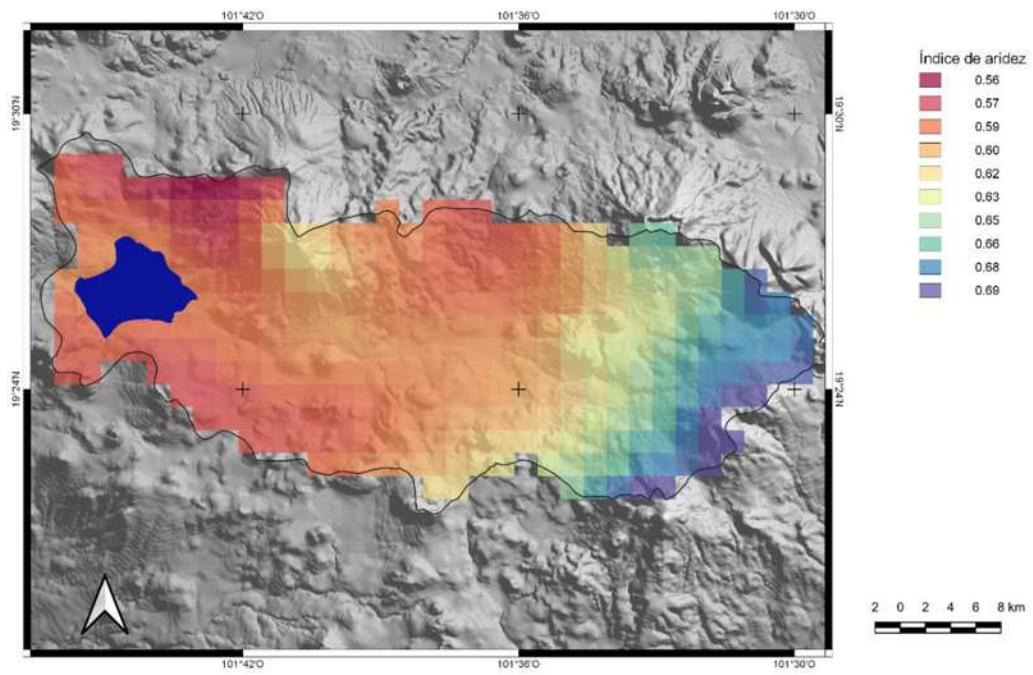


Figura 32 Índice de aridez en la cuenca de Zirahuén (1970-2000)

7.4 Cobertura forestal

Los productos satelitales que se obtuvieron y que contenían la cobertura forestal se compararon el año 2000 vs 2015 para analizar los cambios, se identificaron 5 categorías, ganancia y pérdida de agua en los cuerpos de agua que se encuentren dentro de la cuenca, ganancia y pérdida de cobertura forestal (CF) que se relaciona con la presencia o no de árboles dentro de la cuenca, y el no cambio que es la presencia o ausencia de árboles que se mantuvo en las dos imágenes, en otras palabras, sin modificación.

En esta grafica (figura 33) se observa que en la comparación hubo una mayor ganancia de agua sobrepasando los 120 km² de superficie en los acuíferos que se localizan dentro de la cuenca de Cuitzeo, por el contrario, en el caso de la pérdida de agua se tiene 40 km².

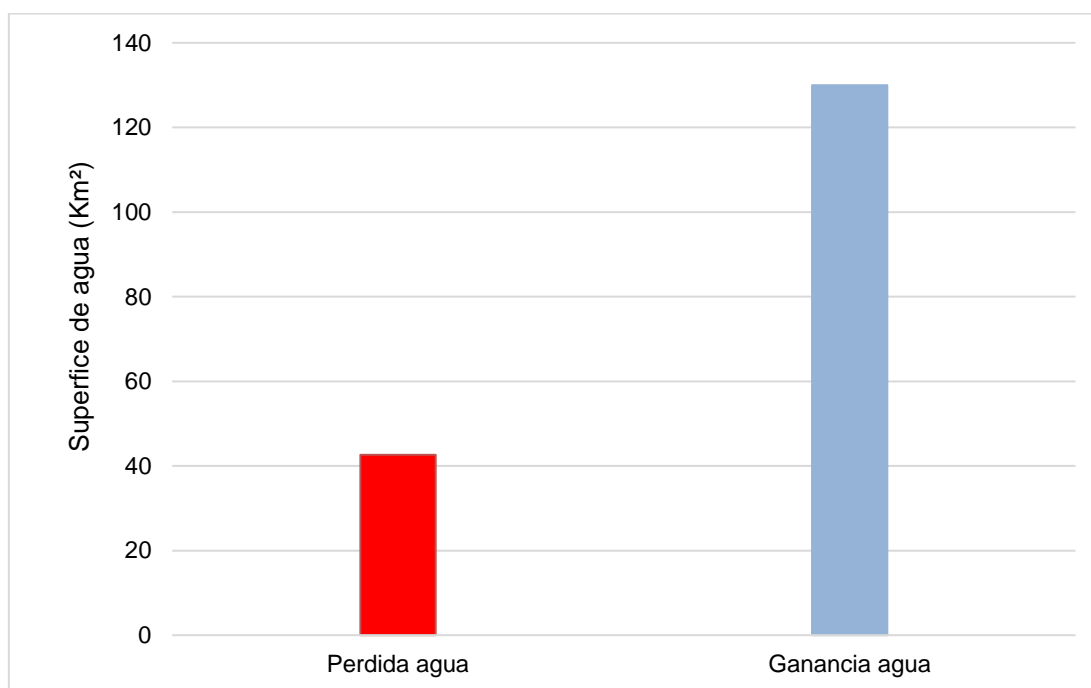


Figura 33 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Cuitzeo (2000-2015)

Para el caso de la cobertura forestal en la cuenca de Cuitzeo se observa (figura 34) que para el comparativo se obtiene la mayor ganancia con 3,313 km², mientras que la pérdida de cobertura es de 346.5 km² y el no cambio 192 km².

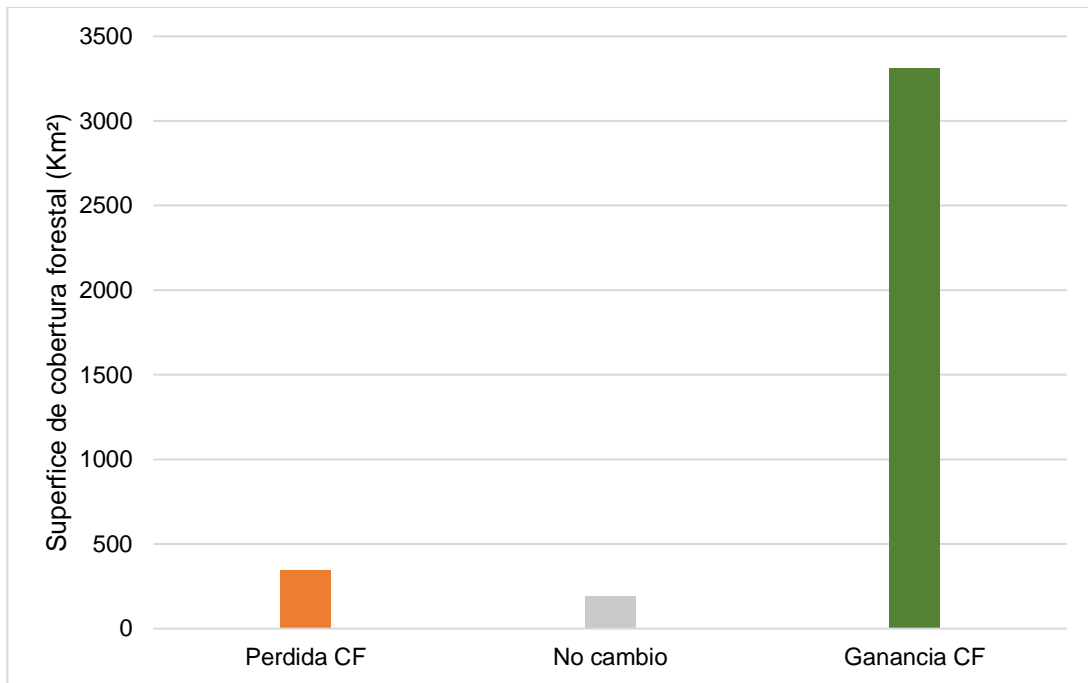


Figura 34 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Cuitzeo (2000-2015)

Los comparativos (figura 35) demuestran una mayor ganancia de agua para la cuenca de Pátzcuaro con 3.07 km², por otra parte, pérdida de agua para la cuenca con 6.65 km² de la superficie.

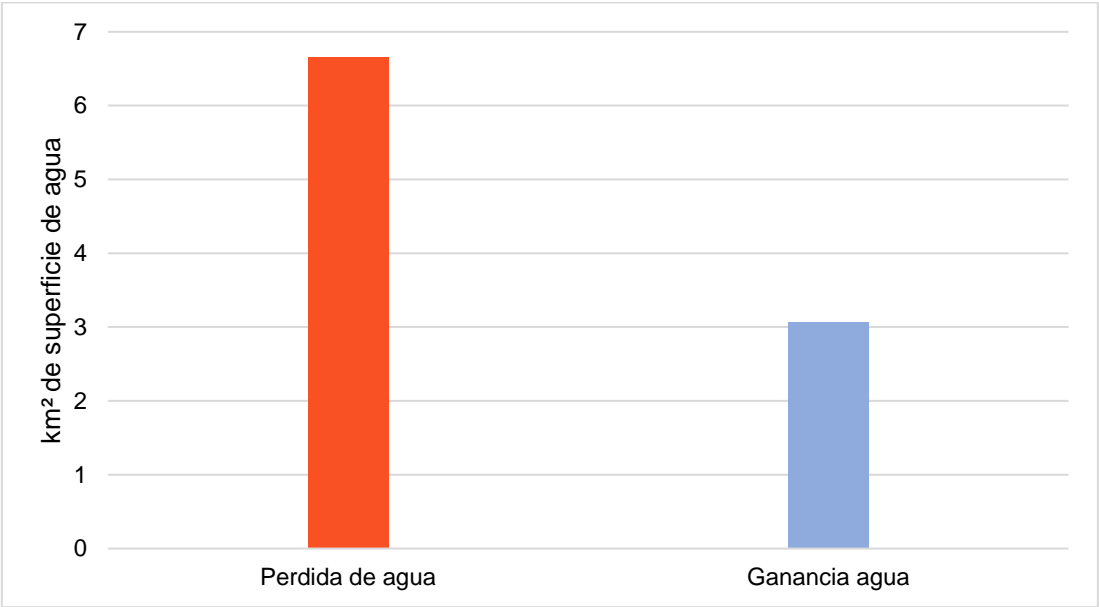


Figura 35 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Pátzcuaro (2000-2015)

El comparativo de cobertura forestal para la cuenca de Pátzcuaro (figura 36), de la cual se obtiene la ganancia con 686 km² y para el año 2000 vs 2005 la mayor pérdida y no cambio con 374 km² y 198 km².

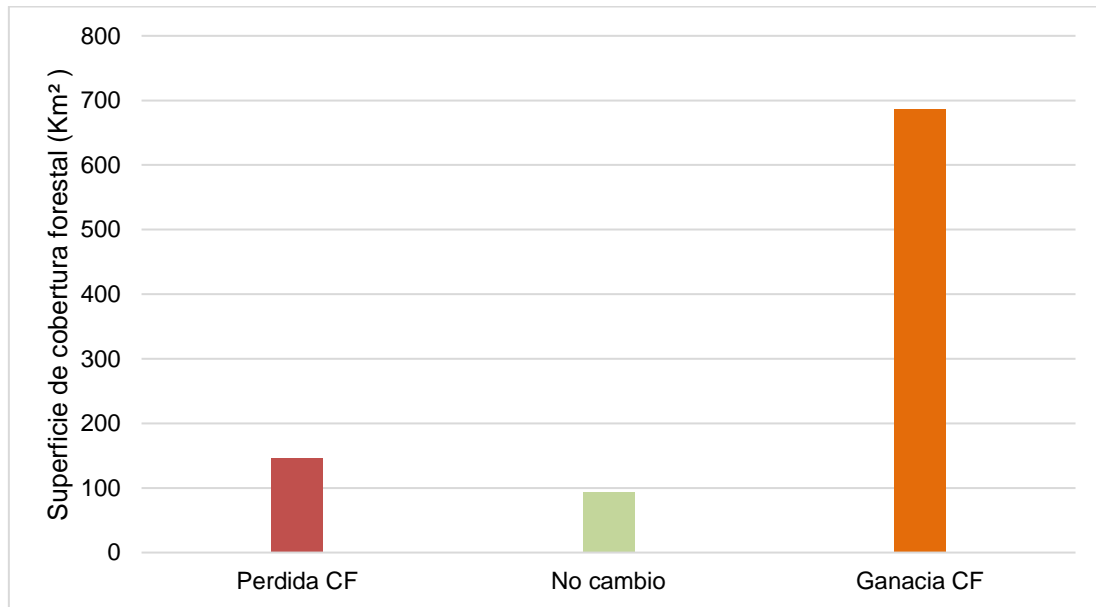


Figura 36 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Pátzcuaro (2000-2015)

El siguiente comparativo muestra las fluctuaciones de los cuerpos de agua de la cuenca de Zirahuén (figura 37), donde la ganancia es de 0.6 km², y la pérdida de agua con 0.8 km².

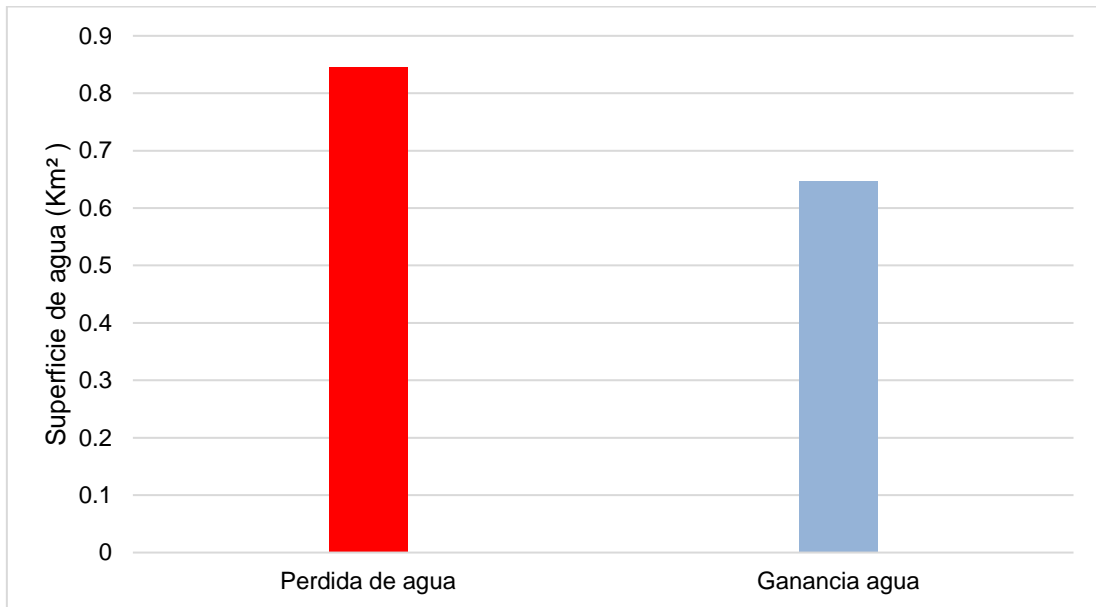


Figura 37 Fluctuaciones de los cuerpos de agua en la cuenca de Zirahuén (2000-2015)

La siguiente gráfica muestra datos de los comparativos de cobertura forestal en la cuenca de Zirahuén (figura 38), de la cual obtenemos una ganancia en la cobertura de 211 km², mientras que la pérdida con 45.8 km² y el no cambio con 14.5 km².

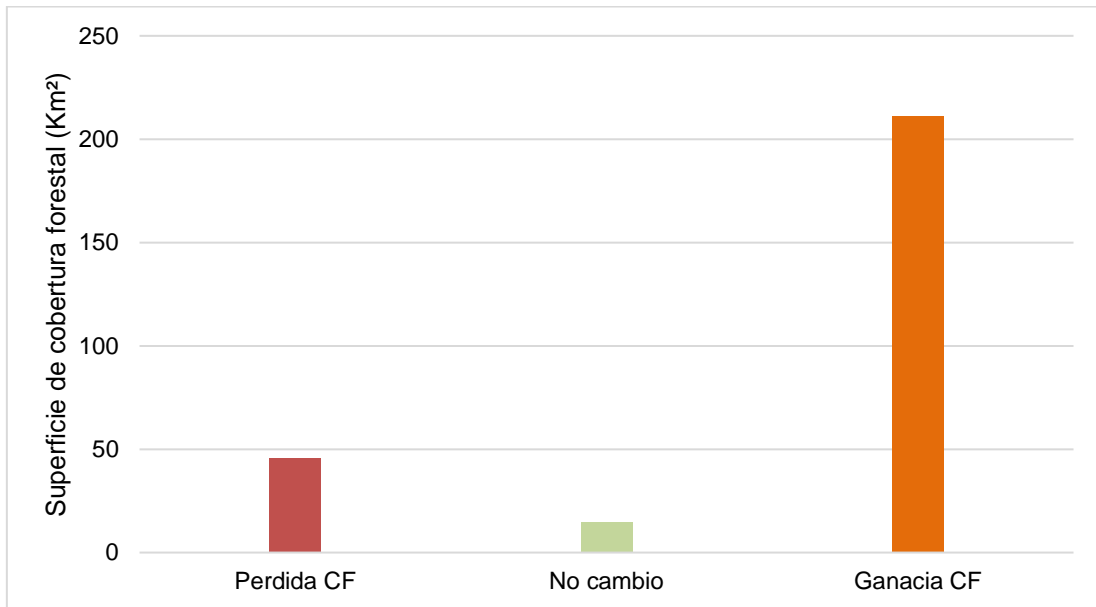


Figura 38 Cambio de cobertura forestal en la cuenca de Zirahuén

8 DISCUSIÓN

La tierra ha presentado cambios de manera cíclica en el transcurso de millones de años y decenas de miles de años antes del periodo que abarca esta investigación. Nos centraremos en los cambios que se han tenido desde 1993 hasta 2019. Los cambios en la superficie de un lago pueden analizarse como una serie de tiempo que proporciona información acerca de la variabilidad climática de una región (Mendoza, 2007).

En el estudio realizado y los datos obtenidos durante esta investigación, se observa una tendencia a la pérdida de superficie de los lagos de Cuitzeo y Pátzcuaro, respondiendo de forma más directa al cambio climático regional y a los ciclos hidrológicos, dejando en segundo término, pero no menos importante la actividad humana.

El lago de Cuitzeo es el más sensible a los ciclos y cambios climáticos, en un parte por su naturaleza tectónica que propicia la baja profundidad media del mismo y el aumento de la temperatura promedio a lo largo del tiempo, que en su conjunto con el déficit en el ingreso de agua en la cuenca hacen más notorios los periodos de sequía y la disminución de la superficie del espejo de agua.

En contraste el lago de Zirahuén muestra una tendencia al aumento en la superficie del espejo de agua, aunque presenta un aumento en el promedio de temperatura, es a una escala inferior con respecto a Cuitzeo y Pátzcuaro. Otro de los motivos que beneficia el crecimiento del espejo de agua está relacionado a la menor cantidad de pérdida de agua de la cuenca y el aumento de la cobertura vegetal que mantienen un

equilibrio en el ecosistema lacustre. Al presentar una morfometría en forma de “U” permite un mayor porcentaje de volumen de agua y con ello una tasa de evaporación menor. En comparación con el lago de Cuitzeo que presenta una tasa de evaporación mayor y en consecuencia un mayor déficit hidráulico según menciona Chacón Torres y colaboradores en 2010.

Un caso especial se presenta con el lago de Pátzcuaro, ya que los datos obtenidos marcan una línea de tendencia a la desecación, la humedad en la cuenca está disminuyendo en comparación a los otros dos lagos ya que el promedio de aridez se aleja del equilibrio y otorga más responsabilidad a la actividad humana en la cuenca, siendo un vertedero de aguas negras y demás desechos que provocan la proliferación acelerada de vegetación acuática.

El cambio climático se ve reflejado directamente en la “vida” de cada ecosistema lacustre, el volumen de precipitaciones, actividad humana, evapotranspiración y por ende déficit en el ingreso del agua a cada cuenca. La relación entre los cambios climáticos se puede apreciar en las diferentes imágenes satelitales que se han obtenido y que nos muestran los mínimos y máximos que han tenido en cada uno de los lagos, coincidiendo de alguna forma con las variaciones climatológicas de la región, tal es el caso del fenómeno de La Niña y El Niño, por ejemplo Cuitzeo presenta el mínimo de superficie del espejo de agua a mediados de 1998 relacionado al último ciclo seco (años niño) comprendido del año 1978 al 2000, por tal razón se puede decir que se está sobre-utilizando el modelo teórico de la deforestación,

erosión, sedimentación y transporte como principal causante del deterioro o degradación de un lago (Mendoza, 2007).

Para efecto de lo antes mencionado tomamos como punto de partida el lago de Cuitzeo en el año 1998, donde alcanzo su mínimo histórico y también una temperatura media de 24 °C, es decir 6 °C por arriba de lo que menciona Vidal, en su artículo del 2010. En contraste para el año 2005 donde el lago alcanza su máximo de superficie del espejo de agua, la temperatura promedio es similar, pero con el índice más bajo de pérdida de agua y más alto de pérdida de cobertura forestal, un caso específico para utilizar el modelo teórico de la deforestación, erosión, sedimentación y transporte.

Bernal-Brooks y colaboradores en 2002 hacen referencia al nivel máximo del lago de Pátzcuaro en los años 30's mismo que durante la segunda mitad del siglo pasado nunca fue alcanzado, mencionan también que el saldo negativo entre la precipitación y la evapotranspiración es compensado con los afluentes subterráneos de la cuenca y la escorrentía sumada a la deforestación y erosión han dado como resultado la pérdida de profundidad del lago y un aumento en el nivel del agua en el siglo pasado. Para el periodo de tiempo establecido en esta investigación se obtiene una pérdida de la superficie de espejo de agua de 4.75 km² tomando en cuenta el mapa base contra la máxima superficie registrada en el periodo de 1993 al 2019, otro resultado de este estudio nos muestra un aumento de la temperatura promedio del lago siendo 16.42, 16.72, y 17.52 °C para las décadas de 1990's, 2000's y 2010's respectivamente, Medina-Orozco en 2019 señala un incremento de las temperaturas

máximas para Pátzcuaro siendo 23.5 °C el promedio de la década de los 70's y también menciona las siguientes temperaturas 25.1, 26.7 y 27 °C para los años de 1980, 1990 y 2000, respectivamente.

Analizando las tendencias y datos obtenidos se demuestra que los lagos cumplen con sus ciclos hidrológicos de manera natural, pero la actividad humana propicia la aceleración y degradación más intensa dentro de los sistemas lacustres, de esta manera el resultado obtenido de la teledetección y los sistemas de información geográfica aportan una recopilación de las variaciones en la superficie del espejo de agua y temperatura de los lagos, formando un panorama histórico para generar escenarios de preservación, para generar predicciones sobre los cambios en los cuerpos de agua y crear mecanismos que mitiguen la posible pérdida de estos, como planes de reforestación de acuerdo a las características de cada cuenca o campañas para la concientización del uso del agua y manejo de desperdicios.

9 CONCLUSIÓN

Los cuerpos de agua son vulnerables y altamente sensibles al cambio climático, por tanto, son los mejores centinelas de estos fenómenos, en esta investigación nos concentramos en los principales lagos de Michoacán, Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. El primero en la actualidad con quizá los rasgos más marcados del deterioro medioambiental, pero que de igual manera sufre los cambios cíclicos que marca el tiempo, de naturaleza tectónica y el más grande el todo Michoacán y segundo más grande en México. El segundo con rasgos no tan severos, pero con crecimiento acelerado de vegetación acuática flotante más relacionado a las actividades socioeconómicas de la región. Por último, el lago de Zirahuén que presenta los menores estragos a nivel volumen de pérdidas y ganancias, pero significativos en porcentaje al tamaño de la cuenca.

El peor de los escenarios es para el lago de Cuitzeo (1998) se obtuvo una pérdida del 85.8% de la superficie del espejo de agua en comparación con el mapa base de 1994 del INEGI, siendo este lago el que presenta la mayor pérdida en porcentaje, comparado con Pátzcuaro y Zirahuén con 25 y 16% respectivamente (cuadro 4).

Cuadro 3 Comparativo de superficie del espejo de agua

	Referencia de literatura (km ²)	Máximo obtenido (km ²)	Mínimo obtenido (km ²)	Mínimo VS Referencia (%)
Cuitzeo	400	350.4	56.8	85.8
Pátzcuaro	90	85.7	67.5	25
Zirahuén	10	9.5	8.4	16

El aumento o pérdida del espejo de agua marca de cierta forma la pérdida de agua en un lago, aunque no representa la proporción real de la pérdida en la totalidad de agua de una cuenca, esto se ve reflejado en los estudios de cobertura forestal ya que se toma en cuenta la ganancia o pérdida de agua en la totalidad de la cuenca.

La teledetección como método base para esta investigación, se apoya de imágenes aéreas o satelitales que permitan el estudio de los cuerpos de agua y su análisis en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG), por lo que es posible estar ausente en el campo y poder estudiar un cuerpo de agua de gran extensión en un periodo de tiempo establecido en pasado o presente.

La temperatura en las cuencas ha cambiado, se notó un aumento, el caso más marcado es Cuitzeo, el más constante en este estudio es Zirahuén y para la cuenca de Pátzcuaro en un nivel intermedio entre los anteriores lagos, esto refleja de manera directa las afectaciones del cambio climático en diversas zonas.

Por lo tanto, para la evapotranspiración se detecta una menor tasa de esta para la cuenca de Zirahuén, seguida por la cuenca de Pátzcuaro y nuevamente Cuitzeo siendo la más afectada (cuadro 5), sin embargo, pese a esto el índice de aridez de la cuenca es mayor en Pátzcuaro, considerando que el cambio de uso de suelo en esta cuenca genera mayor impacto a diferencia de Cuitzeo que es una zona de transición y Zirahuén un lugar más conservado.

Cuadro 4 Comparativo de temperatura, ET0 y AI

	Temperatura promedio (°C)	Evapotranspiración de referencia promedio (mm)	Índice de aridez promedio
Cuitzeo	18.8	1768 a 1800	0.594
Pátzcuaro	16.9	1769 a 1794	0.536
Zirahuén	16.6	1704 a 1797	0.625

Con los resultados obtenidos se sugiere considerar estudios multitemporales para las otras cuencas en Michoacán, generar registros de las temperaturas de los cuerpos de agua de manera sistemática, aumentar los estudios de las pequeñas y medianas cuencas del Estado, elaborar estudios multidisciplinarios para crear una o varias soluciones a los efectos negativos del cambio climático en las cuencas.

10 LITERATURA CITADA

Adrian, R., C. M. O'Reilly, H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller, D. M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk, G. A. Weyhenmeyer y M. Winderl. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54:2283–2297.

Amador G., A., E. Granados L. y M. E. Mendoza. (2011). Tree approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán, Mexico. *investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (76), 34-55.

Bocco, G., G. E. López y M. E. Mendoza. 2012. La investigación ambiental en la cuenca del lago de Cuitzeo: una revisión bibliográfica publicada. Bravo E. M., Barrera C. G., Mendoza, M. E., Sáenz R. J. T., Bahena J. F. y Sánchez M. R (eds). *Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Universidad Nacional Autónoma de México y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. México. pp. 317-345.*

Bernal-Brooks, F. W., A. Gomez-Tagle Rojas y J. Alcocer. (2002). Lake Patzcuaro (Mexico): a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables, and GIS. *Hydrobiologia*, 467, 187-197.

Bravo E, M., F. García O., E. Ríos P., M. Mendoza C., G. Barrera C., E. López G., B. E. Serrato B. y T. Sánchez R. 2008. *La Cuenca del Lago de Cuitzeo:*

Problemática, Perspectivas y Retos Hacia su Desarrollo Sostenible. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología: 32.

Castillo P., M. A. y. R. A. Inoñán M. 2018. Determinación del balance hídrico en la cuenca del río Chicama, región La Libertad, 2016. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú.

Chacón T. A., C. R. M., M. B. Rendón L. y O. Cruz A. (2010). Balance hidrológico del lago de Zirahuén. In C. F. y. M. B. R. L. Ortiz Paniagua (Ed.), Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén (pp. 35-56). México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales.

Chávez-Ramírez E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J.L., Dzul-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A. y Chávez-Simental, J.A. (2013). Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. Tecnología y ciencias del agua, IV (4), 115-126.

Corrales A., R. E. y. V. L. Ochoa. L. 2017. Teledetección y SIG, Herramientas de Gestión en la adaptación al Cambio Climático, Cuenca Alta del Río Goascorán, Honduras. REVISTA CIENCIAS ESPACIALES 10:177-197.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2003. Aguas Continentales y Diversidad Biológica de México: Un recuento actual. Biodiversitas 48:16.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Lagunillas Pátzcuaro (1604), Estado de Michoacán.

Cúnsulo, M., A. Kurbán y A. Papparelli. 2012. INFERENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE URBANO A PARTIR DEL NDVI UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16:11.01-11.07.

Díaz C., G. 2012. El cambio climático. *Ciencia y sociedad* XXXVII (2): 227-240.

Garduño-Monroy, V. H. y. Israde-Alcantará, I. 2010. Geología. Pages 26-31 *Atlas del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental.* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Gómez-Tagle R., A. F. y. A. Gómez-Tagle C. 2010. Hidrología y suelos de la cuenca de Zirahuén, Michoacán. Page 362 in C. Ortiz-Paniagua, y M. B. Rendón L., editor. *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, México.

Gopar-Merino, L. F. y. A. Velázquez. 2016. Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.* pp. 75-88.

- Halifa-Marín A., M. Á. Torres-Vázquez y P. Pérez-Cutillas. (2018). Estudio del índice de aridez bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Almanzora (Almería). Paper presented at the XI Congreso de la Asociación Española de Climatología Cartagena, Colombia.
- Huerto D., R. y S. Vargas V. 2014. Estimación del escurrimiento superficial en la subcuenca Tzurumútaró de la cuenca del lago de Pátzcuaro. pp 21-46 *In* R. Huerto D., editor. Estudio ecosistémico del lago de Pátzcuaro: aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sustentable: volumen II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017, México.
- INEGI-INE-CONAGUA. 2007. Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000. Documento técnico: 35.
- Israde A., I. 2005. Los cuerpos de agua. pp 32-37 *in*: L. E. Villaseñor G., editor. La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Leal-Nares, O. A., M. E. Mendoza y E. Carranza G. 2010. Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM:49-67.

- Morales M., L. M. 2010. Área de estudio. pp 18-21 *in* S. Cram, L. Galicia, and I. Israde-Alcántara, editores. Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Madrigal G., X., A. Novelo R. y A. Chacón T. 2004. Flora y Vegetación acuáticas del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta Botanica Mexicana* 68:1-38.
- Markogianni, V., D. Kalivas, G. P. Petropoulos y E. Dimitriou. 2018. An Appraisal of the Potential of Landsat 8 in Estimating Chlorophyll-a, Ammonium Concentrations and Other Water Quality Indicators. *Remote sensing* 10:22.
- Martínez M., J. y A. Díaz. 2005. Fundamentos de teledetección espacial. CONAGUA, México.
- Medina-Orozco, L. E., N. E. García-Calderón, F. García-Oliva y E. Ikkonen. 2014. Suelos de humedal del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5:111-124.
- Medina-Orozco, L. E., N. E. García-Calderón, F. García O. y E. Ikkonen. 2019. Análisis histórico de la pérdida de humedales del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud XXI*: 83-90.
- Meng, M., N. Jian y Z. Zhi-Guo. (2004). Aridity index and its applications in geo-ecological study. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 28 (6), 853-861.

Mendoza, M., G. Bocco, E. López. G. y M. Bravo. (2007). Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el Lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico. *investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 64, 43-62.

Mercado-Mancera G., E. Troyo-Diéguéz, A. Aguirre-Gómez, B. Murillo-Amador, L.F. Beltrán-Morales, J.L. García-Hernández. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y la desertificación en zonas áridas. *Universidad y ciencia trópico húmedo*, 26(1), 51-64.

Pereyra D., D., D. G. Cruz T. y J. A. A. Pérez S. 2011. La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*:37-50.

Pham, S. V., P. R. Leavitt, S. McGowan y P. Peres-Neto. 2008. Spatial variability of climate and land-use effects on lakes of the northern Great Plains. *Limnology and Oceanography* 53:728-742.

Rendón L., M. B. 2015. El humedal sur del Lago Pátzcuaro (México): Balance hídrico, hidroquímica y funcionalidad. Universidad de Murcia, España.

Rendón L., M. B. 2015. Dinámica del flujo bidimensional y propiedades sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro. Universidad Michoacana de San Nicolás de

- Hidalgo. Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No.HH009. México D.F.
- Ríos, M. J., R. Mendoza R., R. Silva C., R. Simuta C., D. Reyes L. y F. Pascual R. 2018. Elementos para gestión del agua en la cuenca del lago de Zirahuén. *Terra Latinoamericana* 36:431-439.
- Ruíz S., G., G. L. Ayala R., A. Chacón T., C. Rosas M. y M. B. Rendón L. 2010. Descripción morfométrica del lago mediante SIG's. pp. 362. *in* C. Ortiz-Paniagua, y M. B. Rendón L., editor. Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, México.
- Sacristán R., F. 2006. La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*: 13-41.
- Sánchez M., M. 2002. Modelos y aproximaciones para la estimación de la evapotranspiración con información satelital. *Revista de Geografía Norte Grande* 29:107-120.
- Sánchez-Blanco, J., y F. Guevara-Féfer. 2013. Plantas arvenses asociadas a cultivos de maíz de temporal en suelos salinos de la ribera del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botanica Mexicana* 105:107-129.
- Sexton, M. F., S. Channan, X-P. Song, D-H. Kim, P. Noojipady, D. Song, C. Huang, A. Annand, K. Collins, E.F. Vermote, R. Wolfe, J. Masek, J.R.G. Townshend.

- (2016). Earth Science Data Records of Global Forest Cover and Change. User Guide, Global Land Cover Facility.
- Sun J., G. W., X. Sun, S. Lin, Z. Hu y K. Huang. (2020). Elevation-dependent changes in reference evapotranspiration due to climate change. *Hydrological Processes*, 34, 5580– 5594.
- Sutariya S., A. Hirapara y. M. K. Tiwari. (2021). Estimation of Actual Evapotranspiration in Panam Canal Command Using Remote Sensing and Geographical Information System (GIS). *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO)*, 8 (2), 193-199.
- Torrico T., M. A. 2011. Determinación de balances hídricos cuencas de San Jorge y Escaleras en Chuquisaca. Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo y Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable, Bolivia.
- Trabucco, A. y. R. J. Zomer. (2018). Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET₀) Climate Database v2. CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). Published online, available from the CGIAR-CSI GeoPortal at <https://cgiarcsi.community>.
- Vidal Z., R. 2010. Clima. p. 22-25. *In*: S. Cram, L. Galicia, y I. Israde-Alcántara (ed.). Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

- Vekerdy, Z. y. M., M. (2010). Dinámica del lago. In S. G. Cram, L. y Israde-Alcántara, I. (Ed.), Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su Geografía y entorno socioambiental (pp. 220-223). México: Universidad Autónoma de México y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Waldo L. C., J. P. Lhomme, D. LABAT, J. L. GUYOT y G. BOULET. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56 Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica Peruana. Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA, 4, 31-43.
- Williamson, C., W. Dodds, T. K. Kratz y M. A. Palmer. 2008. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:247-254.
- Xie, H., X. Luo, X. Xu, H. Pan, and X. Tong. 2016. Evaluation of Landsat 8 OLI imagery for unsupervised inland water extraction. *International Journal of Remote Sensing* 37:8:1826-1844.
- Yepez, A. y. M. Silveira. B. 2011. Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (revisión). *Colombia forestal* 14 (2) :213-232.