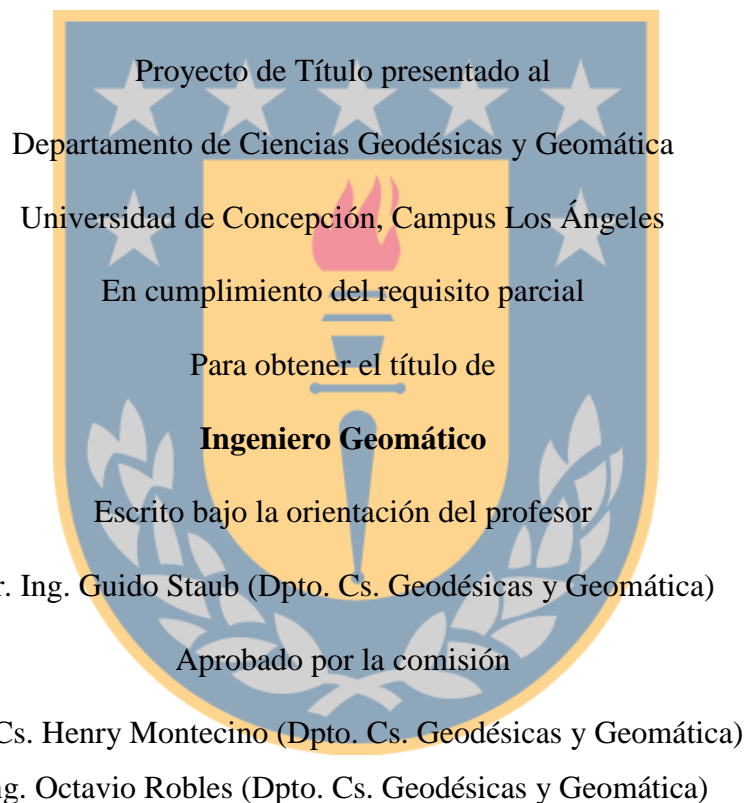


**DETERMINACIÓN DE LAS VARIACIONES SUPERFICIALES Y
VOLÚMÉTRICAS DE LA LAGUNA DEL LAJA EN EL PERIODO
SEPTIEMBRE 2007- SEPTIEMBRE 2018.**

Esteban Alexis Fernández Inostroza



Los Ángeles

Enero, 2019

RESUMEN

La Laguna del Laja se encuentra ubicada en las cercanías del parque Nacional Laguna del Laja en la región del Biobío, específicamente en la comuna de Antuco. Esta laguna es de vital importancia para el equilibrio hídrico de la región del Biobío, como también para la agricultura, el turismo y la generación de energía hidroeléctrica. A pesar de lo anterior se ha visto amenazada por una disminución en sus niveles de agua.

El presente proyecto tiene como fin determinar las variaciones del área y volumen del recurso hídrico de la Laguna del Laja, en el periodo de septiembre 2007 a septiembre 2018.

Para la determinación del área y volumen de la laguna se utilizaron imágenes satelitales (Landsat 5, 7 y 8), un modelo batimétrico y datos de nivel de agua de La Laguna del Laja. La superficie se determina mediante la digitalización del contorno de La Laguna del Laja, utilizando el índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI) y combinación de bandas.

La superficie total perdida durante estos 11 años del estudio fue de 15,82 km² de área y de 0,904 km³ de pérdida de volumen, datos que muestran un descenso importante en estas dos variables de la laguna.

Palabras claves: Laguna del Laja, pérdida, Volumen, Área, imágenes satelitales, batimetría, NDWI, combinación de bandas.

Dedicatoria

Dedico este Proyecto de Título a mis padres Claudia y Rodrigo, los que siempre han estado para mí en cada etapa de mi vida, dándome su apoyo incondicional en las decisiones y nuevos desafíos que afronte. Por darme la formación que forjo mis valores, mis principios y todo lo que soy como persona, gracias por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles y por siempre creer en mí.

A mis hermanos María Jesús y Javier por todos los buenos y divertidos momentos que hemos pasado, juntos sobre todo cuando éramos pequeños. Siempre cuenten conmigo para lo que sea.

A Camila, por el amor incondicional que me has dado durante estos años de relación, porque siempre creíste en mí y en mis capacidades apoyándome y dándome ánimo para salir adelante en los momentos difíciles.

A mi Nino, tía Tole, tía Pao y tío Jorge por todo la ayuda y apoyo que me brindaron durante mis años de carrera.

A mi abuelita Yola, mi tata Julio, mi papi Marco y en especial a mi mami María que me cuidas desde el cielo, por todo el cariño entregado siempre de su parte, las palabras de aliento, su preocupación y fe en mis capacidades.

“Gracias por estar para mí en este proceso, ya que sin su ayuda nada de esto sería posible...”

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de poder estudiar una carrera profesional. Por darme la fortaleza y la energía en los momentos difíciles, para poder lograr mis objetivos en la vida.

A mi profesor guía Guido Staub, por su apoyo y colaboración en este proyecto de título, por su paciencia, dedicación y motivación, siendo mi guía para cumplir el objetivo de terminar la carrera.

A don Roberto Urrutia del centro EULA y Olaf Büttner, por su disposición y la facilitación de material fundamental para el desarrollo del proyecto sin el cual este no se podría haber llevado a cabo.

A el profesor Henry Montecino, por su ayuda en la resolución de algunos inconvenientes que se presentaron durante el desarrollo del proyecto.

A mi familia, por todo el apoyo incondicional dado durante todos estos años de carrera, por siempre querer lo mejor para mi y mi futuro. Por los principios y valores que me han llevado a intentar ser mejor cada día.

A mi pareja Camila Jorquera, por su entrega, amor incondicional y apoyo en los momentos difíciles, gracias por estar a mi lado y por hacer de mi una mejor persona

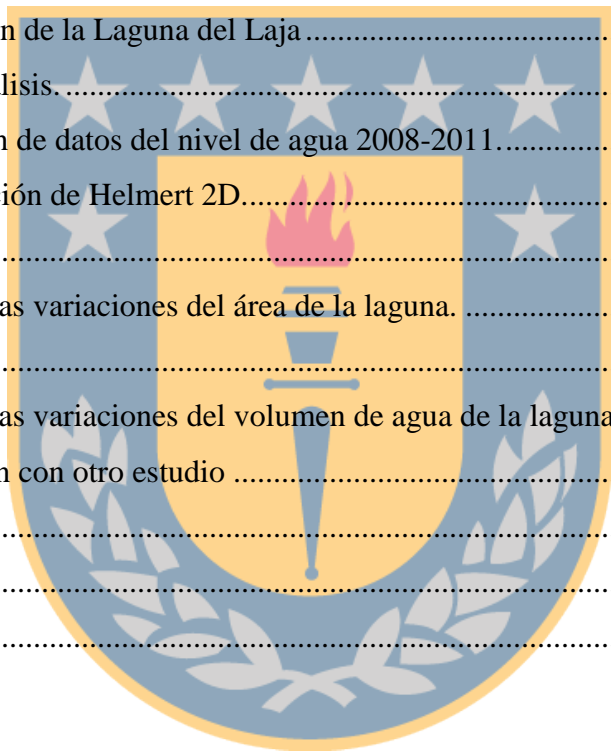
A mis amigos, en especial a Néstor, Aníbal e Ítalo, quienes estuvieron conmigo en este proceso, donde vivimos muchos buenos momentos, por el apoyo que me brindaron a lo largo de la carrera, espero que a pesar de que tomemos caminos diferentes esta amistad perdure.

Y en general a todas las personas que estuvieron en esta etapa de mi vida. Muchas gracias por todo.

Índice de Contenidos

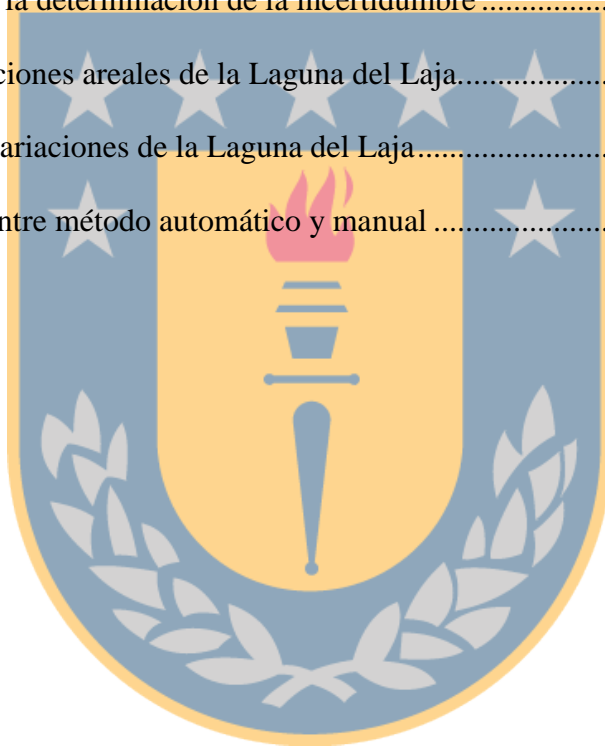
1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
2. Marco teórico.....	4
2.1. Percepción remota.....	4
2.2. Sensores a bordo de misiones Landsat.....	7
2.3. Índices y combinación de bandas.....	8
2.3.1. Índice NDWI.....	8
2.3.2. Combinación de bandas RGB.....	9
2.4. Transformación de semejanzas de Helmert de 4 parámetros.....	10
2.4.1. Traslación.....	10
2.4.2. Rotación θ	11
2.4.3. Escalamiento.....	11
2.4.4. Expresión general.....	11
3. Antecedentes generales.....	13
3.1. Laguna del Laja.....	13
4. Datos y software	16
4.1. Datos.....	16
4.1.1. Imágenes Landsat.....	16
4.1.2. Modelo batimétrico.....	19
4.1.3. Datos de nivel de agua Laguna del Laja.....	20
4.2. Softwares utilizados.....	21
4.2.1. ArcGIS 10.4.1.....	21
4.2.2. ENVI 5.5.....	22
4.2.3. Matlab 8.5.....	22
5. Metodología	23

5.1.	Preprocesamiento.....	24
5.1.1.	Corrección Gap Fill.....	24
5.1.2.	Aplicación de transformación de Helmert 2D al modelo batimétrico.....	26
5.2.	Procesamiento.....	27
5.2.1.	Cálculo índice NDWI.....	27
5.2.2.	Combinación de bandas.....	28
5.2.3.	Digitalización Cuerpo de agua Laguna del Laja.....	28
5.2.4.	Cálculo de área.....	29
5.2.5.	Determinación de la incertidumbre de la superficie.....	30
5.2.6.	Interpolación de datos de nivel de agua.....	32
5.2.7.	Volumen de la Laguna del Laja.....	33
6.	Resultados y análisis.....	34
6.1.	Interpolación de datos del nivel de agua 2008-2011.....	34
6.2.	Transformación de Helmert 2D.....	36
6.3.	Área.....	37
6.4.	Análisis de las variaciones del área de la laguna.....	41
6.5.	Volumen.....	43
6.6.	Análisis de las variaciones del volumen de agua de la laguna.....	45
6.7.	Comparación con otro estudio.....	47
7.	Conclusiones.....	49
8.	Referencias.....	51
9.	Anexos.....	54



Lista de Tablas

Tabla 1: Características de cada una de las bandas de los sensores Landsat 5,7 y 8.....	7
Tabla 2: Los parámetros morfométricos Laguna del Laja.....	15
Tabla 3: Fecha de las imágenes utilizadas para el desarrollo del proyecto.	18
Tabla 4: Combinación de bandas de agua y tierra.....	28
Tabla 5: Valores para la determinación de la incertidumbre.....	31
Tabla 6: Área y variaciones areales de la Laguna del Laja.....	37
Tabla 7 Volumen y Variaciones de la Laguna del Laja.....	43
Tabla 8: diferencias entre método automático y manual.....	48



Lista de Figuras

Figura 1: Componentes de un sistema de teledetección.	5
Figura 2: Espectro Electromagnético.....	6
Figura 3: Bitmap del lago de Chapala, índice NDWI.....	8
Figura4: Usos del suelo/masas de agua	9
Figura 5 Mapa de ubicación Laguna del Laja.....	13
Figura 6: Manejo Hidrológico Laguna del Laja y afluentes.....	14
Figura 7: Sitio web, USGS EarthExplorer (EE).	17
Figura 8: Modelo batimétrico de la Laguna del Laja.....	20
Figura 9 Metodología utilizada para el desarrollo del proyecto	23
Figura 10: Corrección Gap fill a imágenes Landsat 7	25
Figura 11 Puntos del modelo batimétrico sin transformación.....	26
Figura 12: aplicación del índice NDWI en una imagen Landsat 8.....	27
Figura 13: Digitalización de la laguna	29
Figura 14 Incertidumbre del Área.....	31
Figura 15: Interpolación de información de nivel de agua de la Laguna del Laja.....	34
Figura 16: Nivel del agua de la Laguna del Laja dentro del periodo de estudio.	35
Figura 17: Antes y después de transformación de Helmert 2D	36
Figura 18: Área de la Laguna del Laja.....	38
Figura 19: Superficie Máxima y mínima de la Laguna del Laja.	39
Figura 20: Altura m.n.s.m de la Laguna del Laja.	40
Figura 21: Variaciones de área de la Laguna del Laja.....	42
Figura 22 Volumen del cuerpo de agua Laguna del Laja	44

Figura 23 Variaciones volumétricas del cuerpo de agua Laguna del Laja 46

Figura 24: Comparación método automático (Krikau) y manual 47

Figura 25: Diferencia digitalización automática y manual 48



Listado de siglas y abreviaturas

DGA: La Dirección General de Aguas.

EE: EarthExplorer

ENDESA: Empresa Nacional de Electricidad.

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus.

EULA: Centro de investigación ambiental de la Universidad de Concepción.

MOP: Ministerio de Obras Publicas

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NDWI: Normalized Difference Water Index.

OLI: Operational Land Imager.

RGB: Red, Green, Blue.

SIG: Sistema de Información Geográfico

SLC: Scan-Line Corrector.

TIN: Triangulated Irregular Network

TIRS: Thermal Infrared Sensor.

TM: Thematic Mapper.

USGS: United States Geological Service.

UTM: Universal Transverse Mercator.

RMS: Root Mean Square

WGS 84: World Geodetic System 1984.



1. Introducción

El agua es un recurso vital para todos los seres vivos del planeta, en especial para el bienestar y la salud humana, así como para la preservación del medio ambiente y sus ecosistemas. El uso del agua por parte del ser humano va más allá de sus necesidades básicas, siendo fundamental para el desarrollo de la agricultura, ganadería, forestales, procesos industriales, generación de energía eléctrica, entre otras. Por tanto, es necesaria para el desarrollo sustentable de los países y es de vital importancia tener conocimiento de cuanto recurso hídrico se dispone.

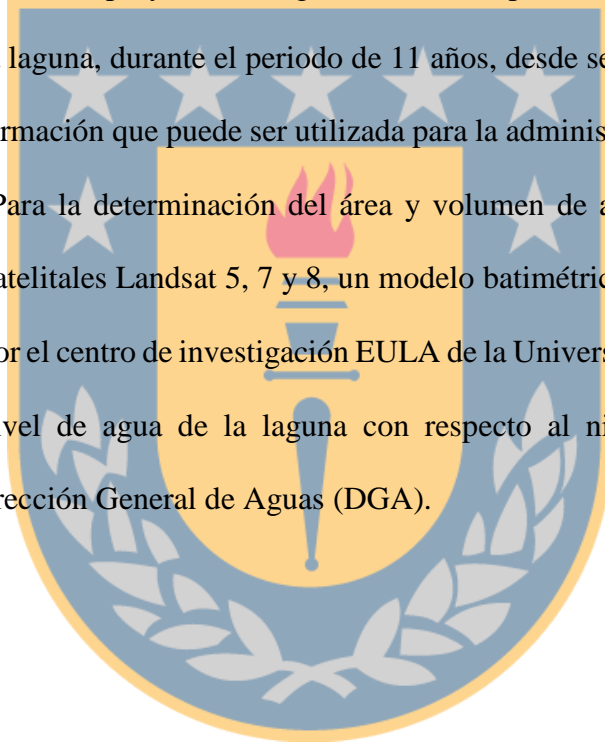
Chile es un país privilegiado, ya que cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos con alrededor de 1.251 ríos, los que se emplazan en las 101 cuencas principales a lo largo del país. Además, hay más de 15.000 lagos y lagunas con todo tipo de formas y tamaños que constituyen un invaluable activo medio ambiental y turístico. Pero esto no significa que no exista déficit de agua o que no se pueda llegar a esto, ya que desde la Región Metropolitana hacia el norte la demanda de este recurso supera con creces la disponibilidad de este (MOP, 2013).

Dentro de las lagunas más grandes e importantes de Chile y de la Región del Biobío se encuentra la Laguna del Laja, la cual tiene una gran importancia en la agricultura (al ser ocupadas sus aguas para el riego de alrededor de 120 mil hectáreas), el turismo (en el Parque nacional Laguna del Laja y el Salto del Laja) y la generación de energía hidroeléctrica (en las Centrales del Abanico, el Toro, Antuco y Quilleco) (DOH 2017). Sin embargo, esta laguna se ha visto afectada con la disminución del agua almacenada, con una tendencia a la baja en el periodo 2007-2013 que alcanzó un máximo de 4100 millones m³ en el año 2007 y un mínimo de cerca de 900 millones m³ en el año 2013 por las

temporadas de sequía (Puertas, 2016). Por otro lado, se observa una reducción de precipitaciones en la zona de la laguna de alrededor de 1500-2000 mm a 780-970 mm anuales, un aumento de temperatura entre 1,3 a 1,6 °C promedio, además se reconocieron variaciones en la cobertura de superficie inundada de la laguna de 9.994,63 ha (1985) a 5.135,6 ha (2013), (Días, Jaque & Ojeda 2018).

La presente investigación tiene como finalidad determinar las variaciones de la Laguna del Laja, en términos de la superficie y volumen.

El estudio realizado en este proyecto entrega información primordial para entender el comportamiento de la laguna, durante el periodo de 11 años, desde septiembre 2007 hasta septiembre 2018, información que puede ser utilizada para la administración más eficiente del recurso hídrico. Para la determinación del área y volumen de agua de la laguna se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8, un modelo batimétrico (Büttner, 2018) de esta, proporcionado por el centro de investigación EULA de la Universidad de Concepción, e información del nivel de agua de la laguna con respecto al nivel medio del mar, recuperadas de La Dirección General de Aguas (DGA).



1.1. Objetivos del proyecto

1.1.1. Objetivo general

Determinar las variaciones de la superficie y volumen de agua de la Laguna del Laja en el periodo de septiembre 2007 a septiembre 2018.

1.1.2. Objetivos específicos

- Cuantificar las áreas del cuerpo de agua de la Laguna del Laja por medio de las imágenes satelitales en el periodo de estudio.
- Calcular los volúmenes del cuerpo de agua por medio de la superficie de la laguna, su modelo batimétrico y datos de nivel de agua de la DGA.
- Determinar las variaciones del área y volumen durante la época de estudio



2. Marco teórico.

En el siguiente capítulo será presentada la percepción remota, la que fue necesaria para la obtención de los datos de superficie de la laguna, por medio de la utilización del índice NDWI y la combinación de bandas. Además de la transformación de Helmert 2D que se utilizó para corregir un desplazamiento en el modelo batimétrico de la laguna.

2.1. Percepción remota.

También conocida como teledetección, la percepción remota es una ciencia o técnica de obtención de información de un objeto o fenómeno por medio del análisis de datos adquiridos por plataformas espaciales. Esto supone que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética (Chuvienco E. 1996).

Campbell y Wynne (2009), definen la percepción remota como “la práctica de obtener información acerca de las superficies terrestres y acuáticas de la tierra utilizando imágenes adquiridas desde una perspectiva superior, por medio de radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida desde la superficie de la Tierra”. Además de misiones como GRACE que se encarga de estudiar y detectar pequeñas fluctuaciones en el campo gravitacional de la tierra.

Los sistemas de percepción remota se constituyen de los siguientes componentes como se muestra en la figura 1.

- Fuente de energía
- Cubierta terrestre
- Sistema sensor
- Sistema de recepción
- Intérpretes

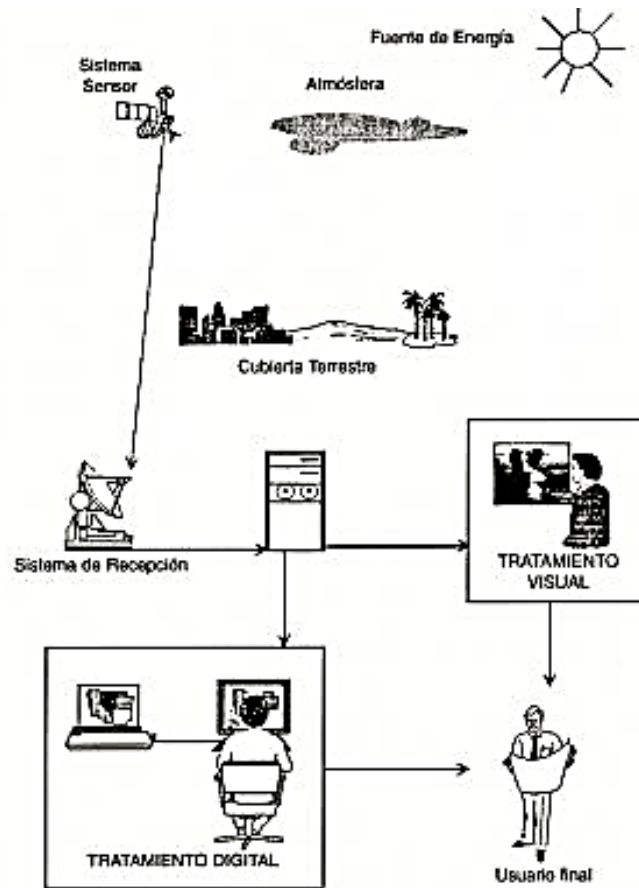


Figura 1: Componentes de un sistema de teledetección (percepción remota).

Fuente: Fundamentos de Teledetección espacial, Chuvieco E. (1996).

Los sistemas de sensores están diseñados para captar la energía procedente de la superficie terrestre de diferentes longitudes de onda o frecuencias del espectro electromagnético (figura 2), codificándola para su posterior almacenamiento de envío al sistema de recepción.

La percepción remota es una técnica destacada por las siguientes ventajas:

- Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.
- Visión panorámica y sinóptica detectando espacios, fenómenos o hechos geográficos

- Información sobre registros o fenómenos no visibles del espectro electromagnético.
- Determinación de medidas cuantitativas sin la necesidad de ir a terreno.
- Registro permanente y extenso de las condiciones del terreno.
- Facilidad de actualización de estudios realizados con esta técnica.
- Integración directa con sistemas de información geográficos (SIG).

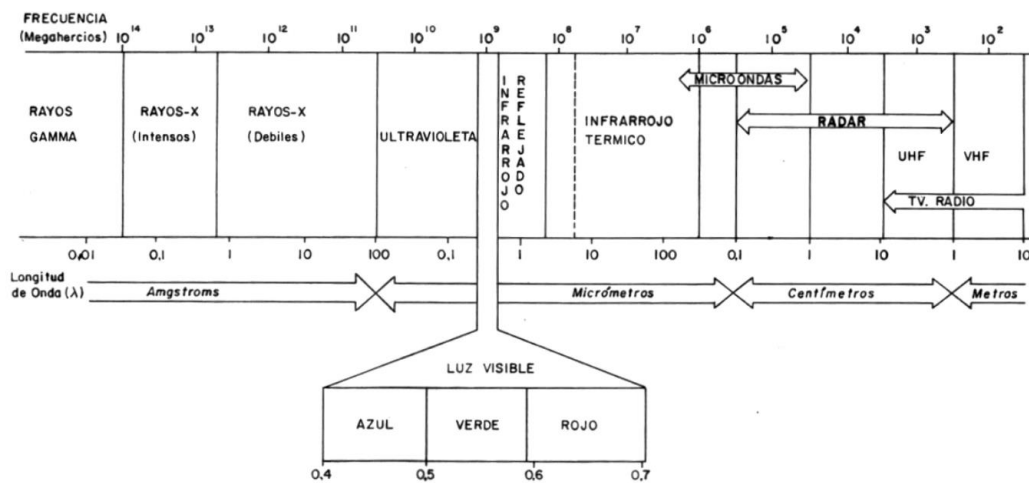


Figura 2: Espectro Electromagnético. nota: Recuperado de Chuvieco (1996)

2.2. Sensores a bordo de misiones Landsat.

El sensor TM (del inglés *Thematic Mapper*) fue diseñado para las misiones Landsat 4 y Landsat 5, que fueron lanzadas en julio de 1982 y marzo 1984 respectivamente. A continuación, se desarrolló el sensor el ETM (del inglés *Enhanced Thematic Mapper*) para el satélite Landsat 6, que se perdió en el lanzamiento ya que este no pudo alcanzar la órbita. El satélite Landsat 7, fue lanzado en abril de 1999 y permanece operativo, este lleva a bordo el sensor el ETM+ (del inglés *Enhanced Thematic Mapper Plus*). La misión más reciente es Landsat 8, con sus sensores OLI (del inglés *Operational Land Imager*) y TIRS (del inglés *Thermal Infrared Sensor*). En la tabla 1 se muestran las características de las bandas de cada uno de los sensores anteriormente mencionados.

Tabla 1: Características de cada una de las bandas de los sensores Landsat 5,7 y 8.

TM (μm)			EMT+ (μm)			OLI/TIRS (μm)		
Band	Interval (μm)	Resol	Band	Interval (μm)	Resol	Band	Interval (μm)	Resol
1	0.45-0.52	(30 m)	1	0.45-0.52	(30 m)	1	0.43-0.45	(30 m)
2	0.52-0.60	(30 m)	2	0.52-0.60	(30 m)	2	0.45-0.51	(30 m)
3	0.63-0.69	(30 m)	3	0.63-0.69	(30 m)	3	0.53-0.59	(30 m)
4	0.76-0.90	(30 m)	4	0.76-0.90	(30 m)	4	0.64-0.67	(30 m)
5	1.55-1.75	(30 m)	5	1.55-1.75	(30 m)	5	0.85-0.88	(30 m)
6	10.40-12.50	(120 m)	6	10.40-12.50	(120 m)	6	1.57-1.65	(30 m)
7	2.08-2.35	(30 m)	7	2.08-2.35	(30 m)	7	2.11-2.19	(30 m)
			8	0.52-0.90	(15 m)	8	0.50-0.68	(15 m)
						9	1.36-1.38	(30 m)
						10	10.60-11.19	(100 m)
						11	11.50-12.51	(100 m)

Nota: Recuperado de Chivieco 2016,

2.3. Índices y combinación de bandas

2.3.1. Índice NDWI.

El “Índice Normalizado del Agua” NDWI (McFeeters, 1996), establece un índice discriminante para los cuerpos de agua, mediante el uso de las bandas espectrales infrarrojo cercano y la banda verde, ya que los valores de la banda infrarrojo cercano en los cuerpos de agua es cercano a cero (Polidorio, 2005). La fórmula para realizar el cálculo es:

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

Donde GREEN corresponde a la banda espectral del Verde y NIR corresponde a la banda del Infrarrojo cercano. Este índice arroja como resultados valores que oscilan entre 1 y 0 para los cuerpos de agua o suelo con alto contenido de humedad superficial y cercanos a -1 para la tierra, vegetación o zonas sin agua (Polidorio, 2005), un ejemplo de la visualización de este índice se muestra en la figura 3.

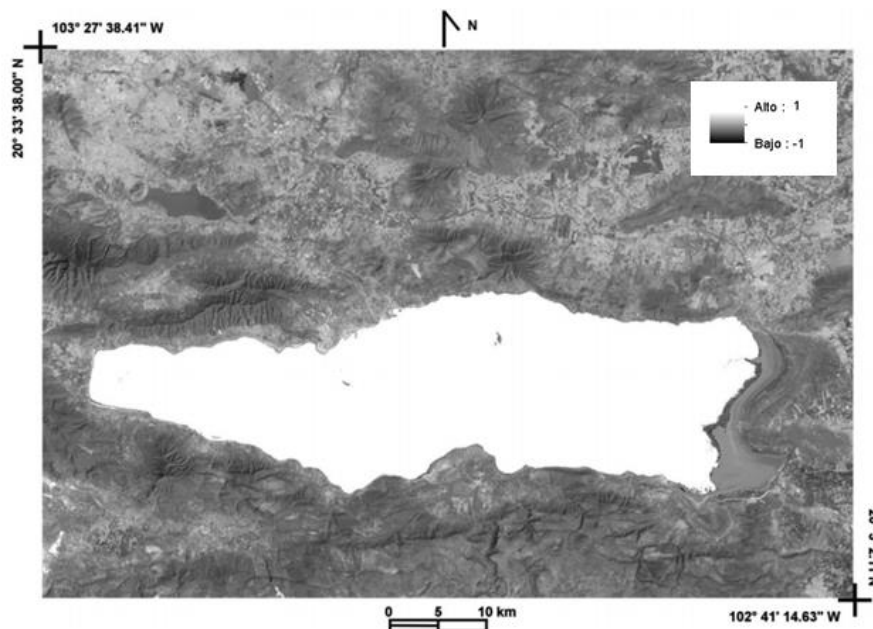


Figura 3: Bitmap del lago de Chapala, índice NDWI
Fuente: Lira, 2006.

2.3.2. Combinación de bandas RGB.

Por medio de la combinación de bandas RGB (del inglés RED, GREEN, BLUE) se crean imágenes en falso color, con las que se facilita la interpretación de ciertos elementos dependiendo de la combinación de bandas utilizada, como lo pueden ser la vegetación, zonas urbanas, nieve, cuerpos de agua, entre otros.

La combinación para la detección de tierra y agua considera las bandas *NIR*, *SWIR1*, *RED*.

La imagen en falso color generada por esta combinación se muestra de la siguiente forma, la banda *NIR* en rojo, la banda *SWIR1* en verde y la banda *RED* en azul (ver figura 4).

Las bandas utilizadas para la generación de la imagen de falso color tienen las siguientes características (EOS, 2018).

- NIR: el agua absorbe casi toda la luz en esta longitud de onda, lo que hace que los cuerpos de agua aparezcan muy oscuros. Los contrastes con la reflectancia brillante del suelo y la vegetación hacen que sea una buena banda para la definición de la interfaz agua / tierra.
- SWIR1: esta banda es muy sensible a la humedad, por lo tanto, se utiliza para monitorear la vegetación y la humedad del suelo en la imagen.
- RED: La vegetación roja absorbe casi toda la luz roja de la banda. Se utiliza para distinguir entre el suelo y la vegetación; también conocer la salud de la vegetación (EOS, 2018).



Figura 4: Usos del suelo/masas de agua: Landsat 8 (5,6,4). Fuente: <http://www.gisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>

2.4. Transformación de semejanzas de Helmert de 4 parámetros.

La transformación de semejanzas de Helmert bidimensional (2D), tiene como principal característica que no varía la verdadera forma de la figura después de la transformación.

Como mínimo para realizar esta transformación de coordenadas se necesita de 2 puntos semejantes en ambos sistemas. Entre más alejados entre si estén los puntos los resultados serán mejores (PÉREZ, 2001, p.8).

Esta transformación reside en la aplicación de:

- Traslación.
- Rotación.
- Cambio de escala.

2.4.1. Traslación.

Se considera que los dos sistemas de coordenadas bidimensionales como paralelos, pero con diferente sistema de origen, se puede expresar de la siguiente forma (Rebolledo, 2010):

$$x_1 = x + Tx$$

$$Y_1 = y + Ty$$

Definido de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Donde x e y son las coordenadas correspondientes al sistema inicial, x_1 e y_1 corresponde a coordenadas del sistema de coordenadas transformado, Tx e Ty Traslación de los ejes x e y

2.4.2. Rotación θ .

Se aplica una rotación θ positiva, mediante un ángulo de rotación del sistema planimétrico inicial, de coordenadas (x, y) , alrededor del origen con sentido de giro antihorario (Rebolledo, 2010).

Se define de la forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Donde θ es el ángulo de rotación

2.4.3. Escalamiento.

Suponiendo que ambos sistemas bidimensionales poseen coordenadas de origen coincidentes, pero diferentes unidades de medida, se aplica un factor escala (k) que permite homogenizar las unidades de medida de ambos sistemas (Rebolledo, 2010).

Se define de la forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Donde k es el factor escala

2.4.4. Expresión general.

Realizando la integración de las traslaciones, rotación y el escalamiento se llega al modelo de transformación de semejanzas de Helmert (Rebolledo, 2010), que expresado de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Expresión general de modelo de transformación de Helmert 2D:

$$x_1 = (k \cdot \cos\theta) \cdot x + (k \cdot \text{sen}\theta) \cdot y + Tx$$

$$y_1 = -(k \cdot \text{sen}\theta) \cdot x + (k \cdot \cos\theta) \cdot y + Ty$$



3. Antecedentes generales.

3.1. Laguna del Laja.

La Laguna del Laja es uno de los cuerpos de agua más importante de la región del Bío Bío y el embalse natural más grande de Chile, teniendo una gran relevancia para la agricultura, el turismo y la generación de energía eléctrica, se encuentra localizada en la provincia del Bío Bío en la comuna de Antuco (figura 5), ubicado por sobre los 1300 msnm.

Esta laguna dispone de dos principales fuentes de captación del recurso hídrico. El primero y más importante es el recurso que recibe de forma natural conformado por los deshielos de cordillera, y la segunda fuente de recurso hídrico de la laguna es la captación Alto Polcura que fue construida en 1977 por la empresa ENDESA para llevar agua desde la cuenca del río Polcura hasta la laguna (figura 6).



Figura 5 Mapa de ubicación Laguna del Laja. Nota: Elaboración propia.

La laguna tiene dos principales salidas de agua, la primera es natural y se produce por las filtraciones del recurso hídrico, a través de las rocas volcánicas. La segunda se produce a

través de un túnel de vaciado de la laguna que fue construido en 1963 que alimenta con agua a la central hidroeléctrica El Toro, esta salida artificial juega un papel fundamental en la extracción del recurso hídrico del cuerpo de agua.

La Laguna del Laja está sujeta al Convenio de Riego del año 1958, hoy correspondiente a la dirección de obras hidráulicas y la Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA), convenio de regulación del Río Laja que define las metas de entrega para el uso hidroeléctrico y limita los derechos de aprovechamiento de aguas para el riego en función del nivel de agua de la laguna del Laja, asegurando el riego para agricultura en las zonas bajas de la cuenca, entregando la responsabilidad de la administración del recurso hídrico a la empresa ENDESA.

El recurso hídrico de la laguna alimenta a 4 hidroeléctricas de la empresa ENDESA, las cuales son la central hidroeléctrica Abanico (1948), central hidroeléctrica El Toro (1963), central hidroeléctrica Antuco (1981) y por último la central hidroeléctrica Quilleco (2007). Este sistema de generación de energía eléctrica se muestra en la figura 6.

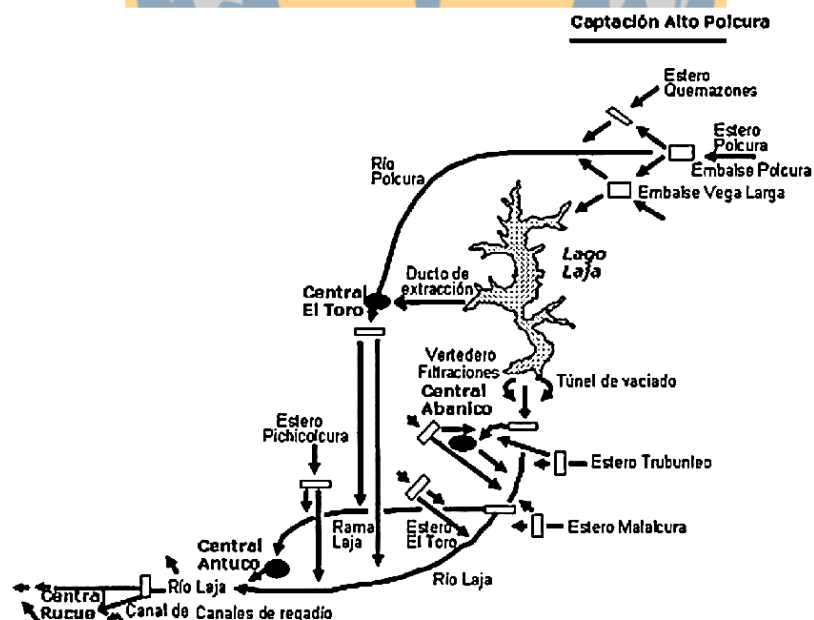


Figura 6: Manejo Hidrológico Laguna del Laja y afluentes. Fuente: Mardones y Vargas (2005).

Mardones y Vargas (2005) afirma que la mayor de estas centrales es El Toro, la que establece una fuerte influencia en las variaciones de volumen y nivel de la laguna, por lo que en estudios anteriores se afirma que a medida que aumenta la producción de energía en la central hidroeléctrica El Toro, el nivel de la Laguna del Laja disminuye.

Los parámetros morfométricos de la Laguna del Laja se muestran en la tabla 2 (Urrutia, 2012)

Tabla 2: Los parámetros morfométricos Laguna del Laja

Parámetro	Valor
Longitud	33 Km
Ancho	3 Km
Altura	1360 m.s.n.m.
Profundidad máx.	Aprox. 120m
Superficie	100 km ²
Capacidad de almacenamiento	5,587 Km ³

4. Datos y software

4.1. Datos.

Para la determinación de la superficie de la Laguna del Laja se utilizaron imágenes satelitales, adquiridas por las misiones Landsat 5, 7 y 8, con sus respectivos sensores MT, ETM+ y OLI.

Para la determinación del volumen de la Laguna Laja, fue necesario ocupar un modelo batimétrico de esta, el cual fue proporcionado por el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción (EULA). El levantamiento batimétrico fue realizado en el mes de noviembre del año 2001. Además, para el cálculo del volumen se ocuparon los datos de nivel de agua de la laguna proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA) del ministerio de obras públicas (MOP) en conjunto con el modelo batimétrico anteriormente mencionado.

4.1.1. Imágenes Landsat.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron imágenes de las misiones espaciales Landsat 5, 7 y 8, desarrollada y controlada por la *National Aeronautics and Space Administration* – NASA en conjunto con el *United States Geological Service* – USGS.

Estas misiones han sido las más exitosas en cuanto a la toma de imágenes satelitales y la cobertura espacio temporal, obteniendo imágenes desde 1972 con el primer satélite Landsat 1, hasta la actualidad gracias al satélite Landsat 8.

Debido a que el periodo del estudio está entre septiembre del año 2007 y septiembre del 2018, se utilizaron imágenes de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, para tener una cobertura completa de este periodo. Las imágenes satelitales fueron descargadas de

USGS *EarthExplorer* (EE) (ver figura 7), que es una plataforma web que permite la búsqueda, descarga y solicitud de imágenes satelitales de las misiones Landsat y otras misiones como ASTER, entre otras.

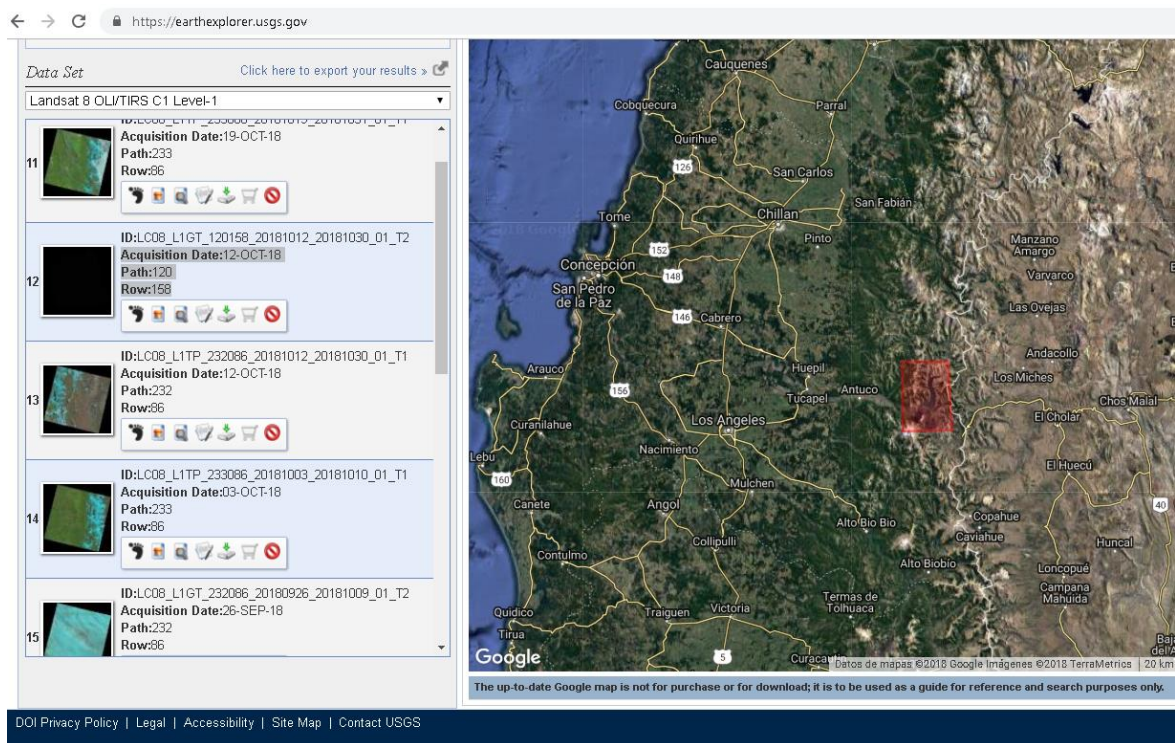


Figura 7: Sitio web, USGS EarthExplorer (EE).

El criterio principal para la descarga de las imágenes satelitales fue que estas fuesen adquiridas en los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre de ser posible, o días cercanos a estos meses. En la tabla 3 se muestra la fecha de adquisición de las imágenes utilizadas y el satélite que tomó la imagen.

Tabla 3: Fecha de las imágenes utilizadas para el desarrollo del proyecto, de los satélites Landsat 5-7 y 8.

Fecha	Landsat			Fecha	Landsat		
	5	7	8		5	7	8
28/09/2007	x			05/10/2013			x
30/11/2007		x		17/12/2013			x
13/03/2008	x			30/03/2014			x
15/10/2008		x		27/06/2014			x
26/12/2008	x			01/10/2014			x
25/03/2009		x		27/12/2014			x
12/06/2009		x		17/03/2015			x
24/09/2009	x			21/06/2015			x
14/01/2010	x			18/09/2015			x
19/03/2010	x			07/12/2015			x
17/07/2010		x		19/03/2016			x
14/11/2010	x			16/06/2016			x
01/01/2011	x			04/09/2016			x
16/04/2011	x			16/12/2016			x
26/06/2011	x			22/03/2017			x
07/09/2011	x			21/07/2017			x
27/12/2011		x		23/09/2017			x
25/03/2012 y 09/03/2012		x		26/12/2017			x
24/09/2012 y 10/10/2012		x		25/03/2018			x
14/01/2013 y 29/12/2012		x		06/06/2018			x
28/03/2013 y 12/03/2013		x		10/09/2018			x
22/05/2013		x					

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones mínimas que debían cumplir estas imágenes para ser descargadas son las siguientes:

- Abarcar de manera completa la extensión del área de estudio.
- Sin nubes en el área de estudio
- Seleccionar imágenes de los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre dentro del periodo de estudio. En el caso de que las imágenes de estos meses no cumplan con las dos primeras condiciones, se buscará alguna imagen de fechas cercana que si cumplan con las condiciones.

4.1.2. Modelo batimétrico.

La batimetría es el equivalente submarino de la altimetría, consta de un levantamiento del relieve superficial subacuático, del fondo del mar, ríos, lagos o embalses, el cual por lo general entrega como resultado un modelo digital detallado de la estructura topográfica del fondo del cuerpo de agua.

El modelo batimétrico (ver figura 8) fue proporcionado por el Dr. Roberto Urrutia del centro de investigación ambiental EULA, un archivo *Shapefile* que contiene las coordenadas UTM (Zona 19H).

El levantamiento batimétrico de la Laguna del Laja fue realizado en noviembre de 2001 por Olaf Büttner del Centro Helmholtz para la Investigación Ambiental (UFZ). El sistema utilizado consistía en un GPS Trimble (4000 SSi, Fa. Trimble) conectado por una sonda de eco (EA400 Simrad). Alrededor de 160 perfiles cruzados se midieron dentro de dos semanas. La distancia entre los perfiles fue de 500 m en la cuenca principal y 1000 m en el resto de la laguna. Al comienzo de las mediciones, el nivel del agua era de 1346 m sobre el nivel medio del mar. Durante la campaña de mapeo el nivel del agua subió 20 cm.

Los datos se procesaron posteriormente utilizando las herramientas ARC / INFO TIN y GRID. Una línea de costa teórica se digitalizó a partir de mapas topográficos (escala 1: 50.000) para la altitud del desbordamiento de la presa en la elevación de 1400 msnm y se usó como línea de borde exterior para el modelo de profundidad de la laguna calculado, además de la extracción de la topografía aledaña a la laguna (Büttner, 2018).

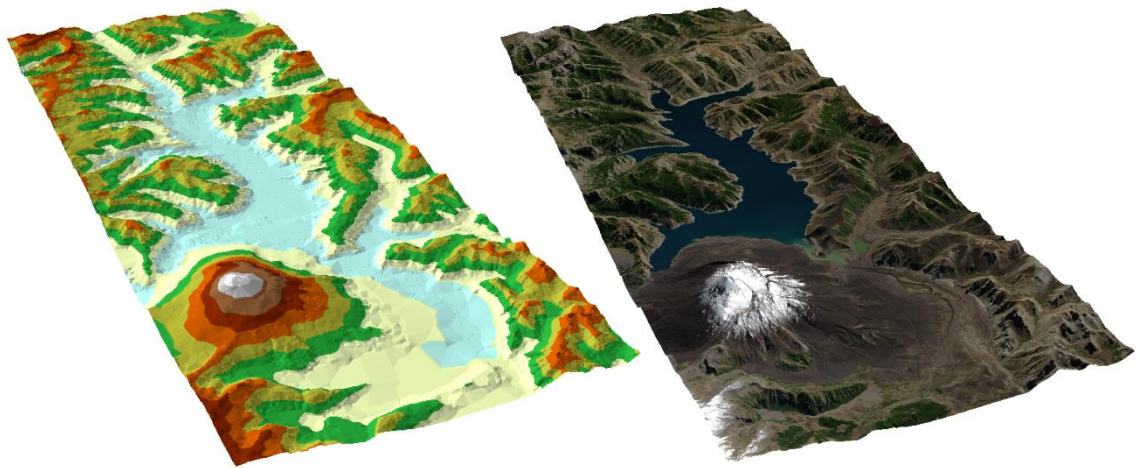


Figura 8: Modelo batimétrico de la Laguna del Laja. Nota: Elaboración propia.

4.1.3. Datos de nivel de agua Laguna del Laja.

Los datos de nivel y altura del agua de la Laguna del Laja fueron obtenidos directamente de una aplicación web (descargadas de <http://www.dga.cl/Paginas/estaciones.aspx>) de la DGA del MOP. Se seleccionó la información de la estación de nombre LAGUNA DE LA LAJA (LM), código 08370007-6 que está ubicada en las coordenadas UTM WGS84 Este: 290.413 y norte: 5.861.754, de estado vigente en la actualidad.

La información recopilada que entrega esta estación es, el nivel de agua promedio en las fechas de captura de las imágenes satelitales utilizadas en el desarrollo del proyecto.

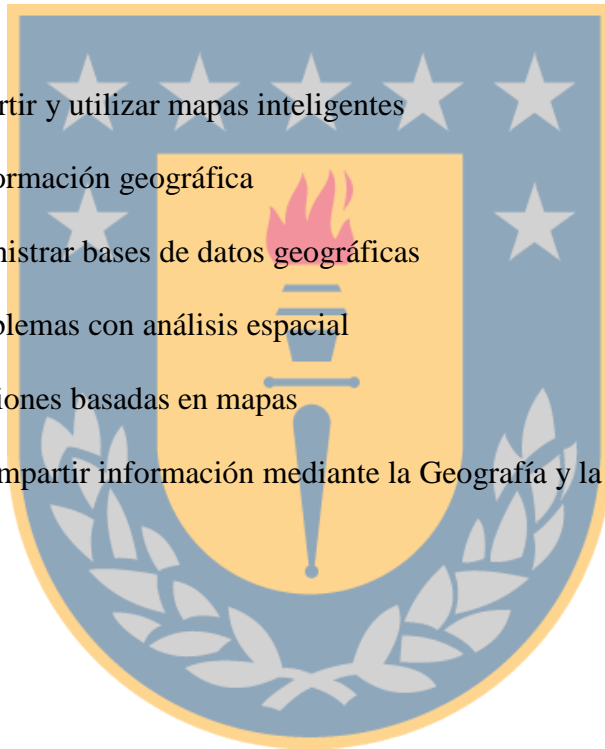
4.2. Softwares utilizados.

4.2.1. ArcGIS 10.4.1.

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma más utilizada a nivel mundial para crear y utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, las empresas, la ciencia, la educación y los medios.¹

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes
- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas con análisis espacial
- Crear aplicaciones basadas en mapas
- Conocer y compartir información mediante la Geografía y la visualización



¹ ArcGIS <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

4.2.2. ENVI 5.5.

ENVI es el software especializado en el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales, con una gran variedad de herramientas y flujos de trabajo automatizados, que pueden integrarse de manera sencilla a las soluciones ArcGIS de Esri. Además, de soportar una gran variedad de satélites y sensores aerotransportados, como pancromáticos, multiespectrales, hiperespectrales, radar, lidar, térmico y más. ENVI proporciona herramientas de pre-proceso automático que permiten obtener información de manera fácil y rápida, a través de sencillos flujos de trabajo².

4.2.3. Matlab 8.5.

Matrix Laboratory – MATLAB es un software para realizar cálculos numéricos con lenguaje basado en vectores y matrices, que es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Se utiliza para resolver problemas científicos y de ingeniería. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Una vasta biblioteca de herramientas (Toolboxes) integradas le permite empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio³.

Características principales:

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería.
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar y muchas otras tareas.
- Toolboxes para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas

² ENVI <http://www.sigs.info/productos/envi>

³ MATLAB https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

5. Metodología

En este capítulo será presentada la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto (ver figura 9). Primero se realizó la corrección de las imágenes *Landsat 7*, debido a la falla del sensor SLC mediante el uso de la herramienta *Gap fill*. Además de la transformación de Helmert 2D, aplicada al modelo batimétrico para la corrección del desplazamiento que este tenía.

Para la digitalización de la superficie de la Laguna del Laja se utilizó el índice NDWI y la combinación de bandas. Con esta superficie se procedió al cálculo del área para cada una de las fechas.

Posteriormente se realizó una interpolación polinomial de grado 4, de los años sin datos de nivel de agua de la laguna en el periodo 2008-2011.

Finalmente se realizó el cálculo del volumen de la Laguna del Laja utilizando las superficies, el modelo batimétrico y los datos de altura de agua de la laguna.

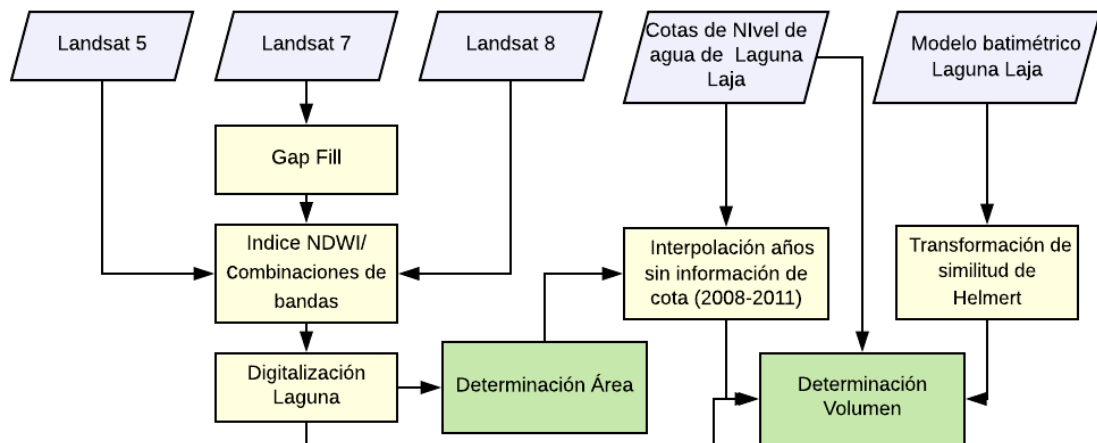


Figura 9 Metodología utilizada para el desarrollo del proyecto

5.1. Preprocesamiento.

5.1.1. Corrección Gap Fill.

Debido a la falla que ocurrió en 2003 en el corrector de la línea de exploración (SLC del inglés *Scan-Line Corrector*) del sensor ETM+, a bordo del satélite Landsat 7, se produce una pérdida de datos que equivalen aproximadamente al 22% de los píxeles de las imágenes tomadas por este sensor, ya que estos no se escanean (Pringle, 2009).

Scaramuzza, (2004) desarrolló una técnica que se utiliza para rellenar los píxeles sin información en una imagen, con datos de otra imagen Landsat. Se aplica una transformación lineal a la imagen de relleno para ajustarla en función de la desviación estándar y los valores medios de cada banda.

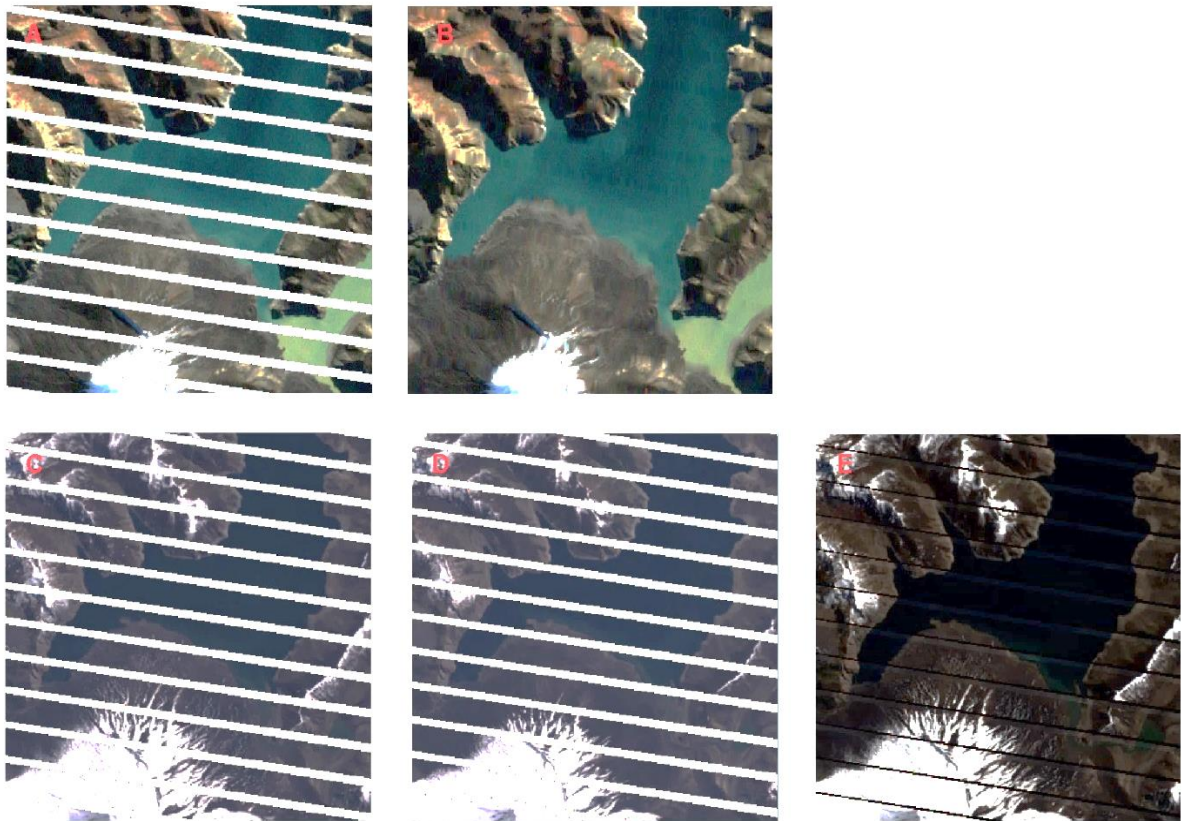
Para el relleno del espacio de las imágenes se utilizaron dos métodos. El primero fue el método de Triangulación (*Single file gap-fill (Triangulation)*) el cual solo necesita de una imagen y el segundo método que utiliza estadísticas globales para la coincidencia del histograma entre dos imágenes, (*Two band gap fill(global histogram matching)*).

En la tabla 3 se muestran las fechas de las imágenes utilizadas del satélite Landsat 7. Para las fechas con una sola imagen se aplicó el método de triangulación y para las fechas con dos imágenes se aplicó el método de coincidencia del histograma.

Para la aplicación del segundo método debían cumplir con los siguientes criterios:

- Las imágenes, al menos en el sector de estudio deben estar libres de nubes.
- Las imágenes utilizadas deben ser de un periodo lo más cercano posible a los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre (Landsat repite la misma cobertura del área cada 16 días).

En la figura 10 se aprecia que en la imagen A y B está el antes y el después de la corrección Gap fill, realizada con el método de Triangulación a la imagen Landsat 7 tomada el 17 de julio de 2010. Además, en la imagen C y D se muestran las dos imágenes Landsat 7 utilizadas para la corrección gap fill con estadísticas globales, tomadas el 24 de septiembre y 10 de octubre del año 2012 respectivamente y por último en E se aprecia el resultado de la corrección.



*Figura 10: Corrección Gap fill a imágenes Landsat 7
Nota: Elaboración propia*

5.1.2. Aplicación de transformación de Helmert 2D al modelo batimétrico.

El modelo batimétrico presenta un desplazamiento que se muestra en la figura 11. Por este motivo, fue necesario realizar una transformación de Helmert 2D para su corrección.

Por medio de una transformación de Helmert 2D se expresa la relación que existe entre dos sistemas cartesianos que discrepan en la situación del origen, en la orientación de los ejes y en la unidad de medida a lo largo de los mismos, por lo tanto, se busca determinar la variación constante a lo largo de cada eje.

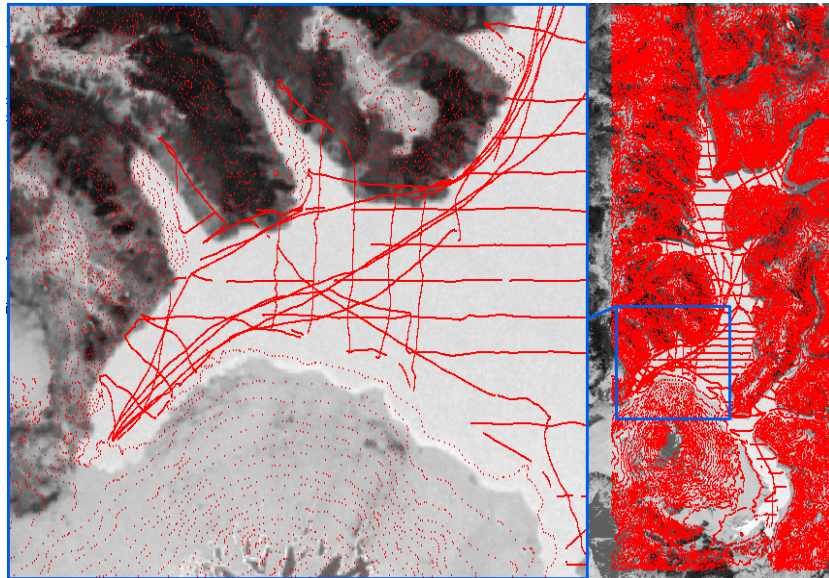


Figura 11 Puntos del modelo batimétrico sin transformación. Nota: Elaboración propia.

Se tomó una muestra de 37 puntos en el sistema de coordenadas “inicial” (Anexo 1), con sus puntos homogéneos respectivos en el sistema de coordenadas “nuevo” (Anexo 2), los que se tomaron de una imagen Landsat 7 de 29 del noviembre de 2001, a la cual se aplicó el índice NDWI, imagen cercana a la fecha del levantamiento hecho para la generación del

modelo y que se utilizaron para la determinación de los parámetros de transformación de Helmert 2D.

Se utilizó una función en el software MATLAB, generada por Peter Wasmeier (2018) para la determinación de los parámetros de transformación de Helmert 2D.

La transformación presento un error que expresado en términos de *Root Mean Square - RMS* fue de 22,372 m, determinado mediante una imagen Landsat 7 del 29 de noviembre de 2001.

5.2. Procesamiento.

5.2.1. Cálculo índice NDWI.

A todas las imágenes satelitales correspondientes al estudio, se le aplicó el cálculo del índice NDWI, para su posterior utilización en la determinación y digitalización de la superficie del cuerpo de agua de la Laguna del Laja. La figura 12 muestra la visualización de este índice NDWI en la imagen de la derecha, mientras que a la izquierda se muestra la imagen en color real (imagen Landsat 8 del 10 de septiembre de 2018).



Figura 12: aplicación del índice NDWI en una imagen Landsat 8.
Nota: Elaboración propia

5.2.2. Combinación de bandas.

La combinación de bandas NIR, SWIR1, RED. fue utilizada para facilitar la identificación de tierra y agua (Tabla 4). Esta fue utilizada para corregir los polígonos generados a partir del índice NDWI ya que, con este no se logra la identificación completa del cuerpo de agua en algunos sectores.

Tabla 4: Combinación de bandas para la generación de imágenes de falso color para la detección de agua y tierra

Satélite	RED	GREEN	BLUE
	Banda NIR	Banda SWIR1	Banda Red
Landsat 5 MT	4	5	2
Landsat 7 EMT+	4	5	2
Landsat 5 OLI/TIRS	5	6	3

5.2.3. Digitalización Cuerpo de agua Laguna del Laja

La digitalización del cuerpo de agua de la Laguna del Laja fue realizada con el fin de determinar las variaciones superficiales que ocurrieron en la laguna. Para esto se utilizó el índice NDWI y la combinación de bandas para la identificación de tierra y agua descrita anteriormente. Utilizando el índice NDWI se realiza una digitalización semiautomática de la laguna por medio de la clasificación de los valores de píxel mayores que 0, aumentando este valor hasta notar que los valores clasificados sólo corresponden a cuerpos de agua, para su posterior transformación en un *shapefile* de polígonos. Además de ser complementados y editados de manera manual con respecto a las imágenes de falso color generada por la combinación de bandas, para obtener una mejor digitalización de la laguna ya que, el índice NDWI no logra la identificación completa del cuerpo de agua en algunos sectores de la laguna. Como la superficie del cuerpo de agua se extrajo de imágenes

satelitales con una resolución espacial de 30 m., se generan errores que corresponden a aproximadamente uno o dos píxeles en la imagen satelital (Gulcan y Ozcelik, 2017).

En la figura 13 se muestra un ejemplo de un resultado obtenido, donde la primera imagen corresponde al índice NDWI, en la segunda imagen se muestra la combinación de bandas para detección de tierra y agua, y por último, el Shapefile poligonal de la superficie de la Laguna del Laja de la fecha correspondiente a la imagen (10 de septiembre de 2018).

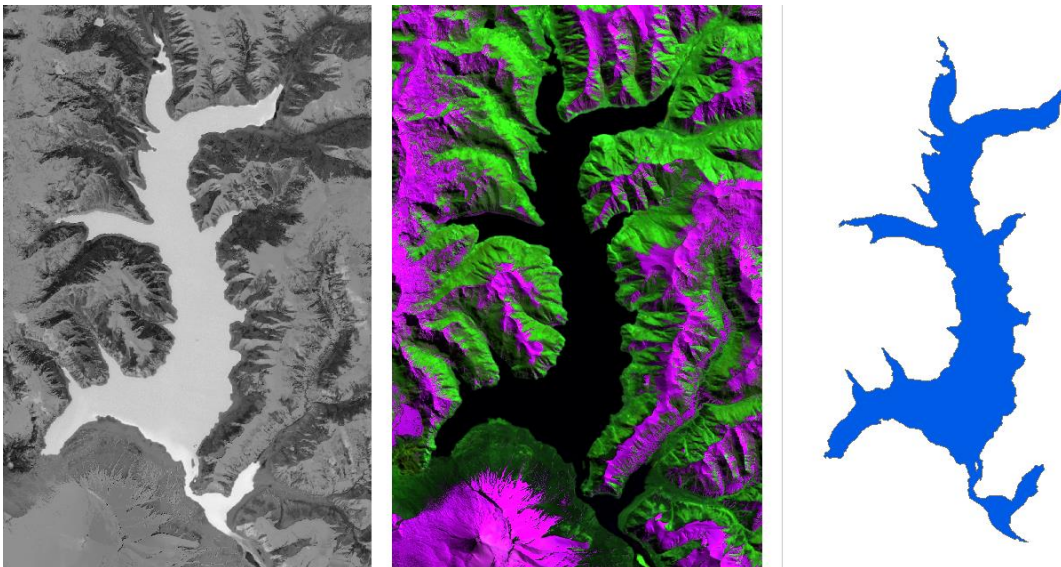


Figura 13: Digitalización de la laguna

5.2.4. Cálculo de área

Una vez realizada la digitalización de la superficie de la Laguna del Laja en el periodo de estudio, se procede a la determinación de las áreas por medio del uso de la herramienta del *software* ArcGIS “calculadora de geometría”, de cada uno de los polígonos. Para esto todos debían estar en el mismo sistema de coordenadas proyectadas UTM huso19 sur, con respecto al *Datum* WGS 84.

Para el cálculo de área se utiliza la fórmula de área de Gauss, la cual ocupa las coordenadas de los vértices de un polígono para la estimación de la superficie.

La fórmula se representa mediante la siguiente expresión.

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^n x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|$$

Donde A es el área del polígono, n es el número de lados del polígono y (x_i, y_i) las coordenadas de los vértices del polígono.

5.2.5. Determinación de la incertidumbre de la superficie

Para la determinación de los valores de incertidumbre correspondientes a las áreas calculadas, se realizó nuevamente dos digitalizaciones de la superficie de la laguna, al 30% del total de imágenes del estudio, lo que corresponde a 13 imágenes seleccionadas de forma homogénea, aproximadamente en intervalos de 2,8 km² de superficie de la laguna, para generar una cobertura completa entre las áreas máxima y mínima.

Una vez determinada las áreas que se volvieron a digitalizar (dig 2 y dig 3), se procede a la determinación de la incertidumbre producida por la digitalización, para lo cual se calcula RMS de las variaciones entre la primera digitalización y las dos nuevas (2-1 y 3-1), además de la variación entre la segunda y tercera digitalización (3-2) (ver tabla 5).

Se determinó la tendencia de la incertidumbre por medio de una ecuación lineal, con esta se calculó la incertidumbre para los demás valores de superficie.

La ecuación lineal utilizada para la determinación de la incertidumbre es:

$$y = 0,0093x - 0,3381$$

Donde: x es el área del polígono digitalizado e y es la incertidumbre del área estimada.

Tabla 5: Valores para la determinación de la incertidumbre

fecha	Km ²						
	Dig 1	Dig 2	Dig 3	Variación (2-1)	Variación (3-1)	Variación (3-2)	RMS
14/01/2010	81,194	81,664	81,095	0,470	-0,099	-0,569	0,430
28/09/2007	78,078	77,794	78,083	-0,284	0,004	0,288	0,234
13/03/2008	75,800	74,850	75,211	-0,950	-0,589	0,360	0,678
17/07/2010	72,644	72,375	72,344	-0,268	-0,299	-0,031	0,233
01/01/2011	70,178	69,812	69,947	-0,366	-0,231	0,136	0,262
27/12/2014	66,995	66,910	66,561	-0,085	-0,434	-0,349	0,326
19/03/2016	63,467	63,830	63,537	0,363	0,070	-0,293	0,272
10/09/2018	62,258	62,147	62,249	-0,111	-0,009	0,103	0,088
25/03/2018	59,365	59,742	59,883	0,377	0,519	0,142	0,379
26/06/2011	56,550	56,561	56,622	0,010	0,072	0,062	0,055
30/03/2014	53,301	53,275	53,304	-0,026	0,003	0,029	0,023
27/06/2014	50,568	50,990	50,789	0,422	0,221	-0,201	0,298
22/05/2013	48,652	48,467	48,525	-0,185	-0,127	0,058	0,134

Se puede apreciar claramente que, al aumentar la superficie de la laguna, aumenta la incertidumbre o error del valor, esto se ve claramente reflejado en la figura 14 y en la ecuación lineal que representa la incertidumbre.

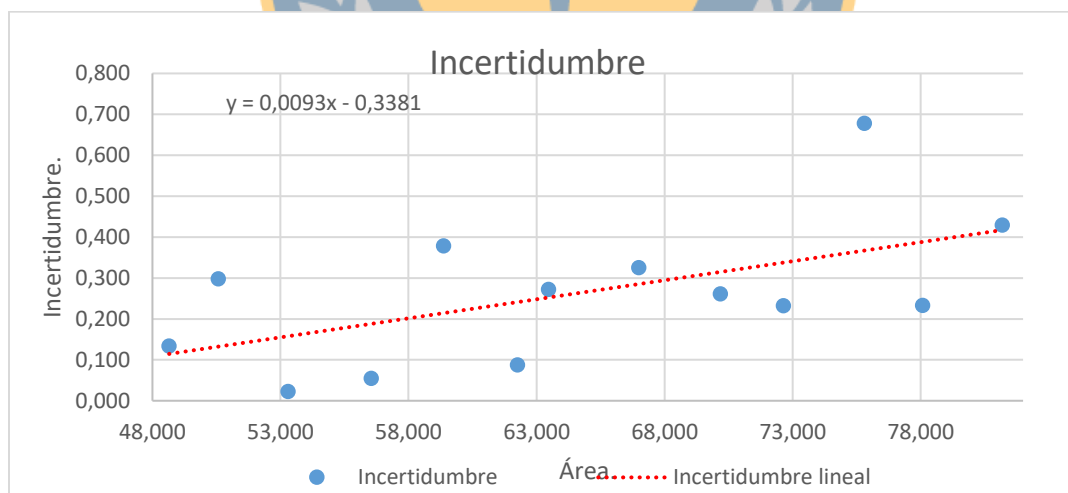


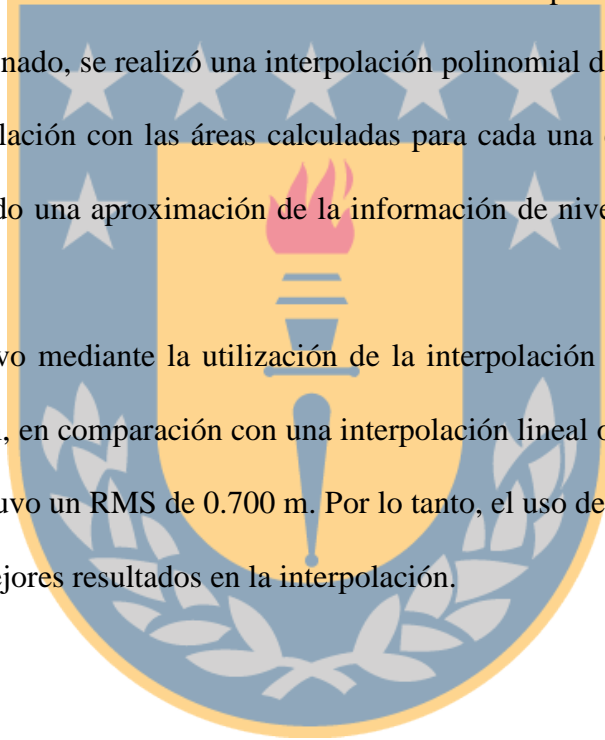
Figura 14 Incertidumbre del Área

5.2.6. Interpolación de datos de nivel de agua

Una vez determinadas las áreas de cada una de las superficies de la laguna, se realizó una interpolación polinomial de grado cuatro para la obtención de un aproximado del nivel del agua de la Laguna del Laja, en el periodo sin datos de enero de 2008 hasta diciembre de 2011, fechas en las que la estación que mide el nivel del agua dejó de funcionar por problemas técnicos. En enero de 2012 la estación comenzó a funcionar con normalidad hasta la actualidad teniendo mediciones diarias.

Para solucionar el problema de la falta de información del periodo de cuatro años, anteriormente mencionado, se realizó una interpolación polinomial de grado cuatro de los datos de altura, en relación con las áreas calculadas para cada una de las fechas, la que entrega como resultado una aproximación de la información de nivel de agua la Laguna del Laja.

El RMS que se obtuvo mediante la utilización de la interpolación polinomial de grado cuatro fue de 0.270 m, en comparación con una interpolación lineal o polinomio de grado uno con el que se obtuvo un RMS de 0.700 m. Por lo tanto, el uso del polinomio de grado cuatro nos entrega mejores resultados en la interpolación.



5.2.7. Volumen de la Laguna del Laja

Posterior a la digitalización de los límites y cálculo de la superficie de la Laguna del Laja para cada una de las fechas de estudio, se procede al cálculo del volumen de este cuerpo de agua en el periodo de septiembre 2007 a septiembre 2018.

Para tal estimación, se utilizó la herramienta del software ArcGIS “Volumen de polígono”, la que calcula el área volumétrica y de superficie entre un polígono con una altura constante y una superficie. Por lo tanto, para este cálculo se utilizó las capas poligonales de la superficie generadas a partir de la digitalización de las imágenes satelitales, los niveles del agua de la laguna correspondiente a cada una de las fechas en estudio y el modelo batimétrico de la Laguna del Laja con el que se generó una malla TIN (Triangulated Irregular Network).



6. Resultados y análisis.

A continuación, se presentan los resultados de la interpolación del nivel de agua de la laguna y la transformación de Helmert 2D aplicada al modelo batimétrico.

Además de los resultados de área y volumen de la Laguna del Laja con sus respectivas variaciones en el periodo de septiembre de 2007 a septiembre de 2018 y una comparación con otro estudio realizado de la superficie de la Laguna del Laja.

6.1. Interpolación de datos del nivel de agua 2008-2011.

De acuerdo con la interpolación generada para la determinación de una aproximación de los niveles de agua faltantes, en el periodo de cuatro años de 2008-2011, se generó el siguiente resultado mostrado en la figura 15.

La ecuación de interpolación es:

$$y = -8.9 \cdot x^4 + 0.00322 \cdot x^3 - 0.40001 \cdot x^2 + 21.7265 \cdot x + 873,83190$$

donde x representa la de superficie del cuerpo de agua e y representa los valores de nivel de agua de la Laguna del Laja.

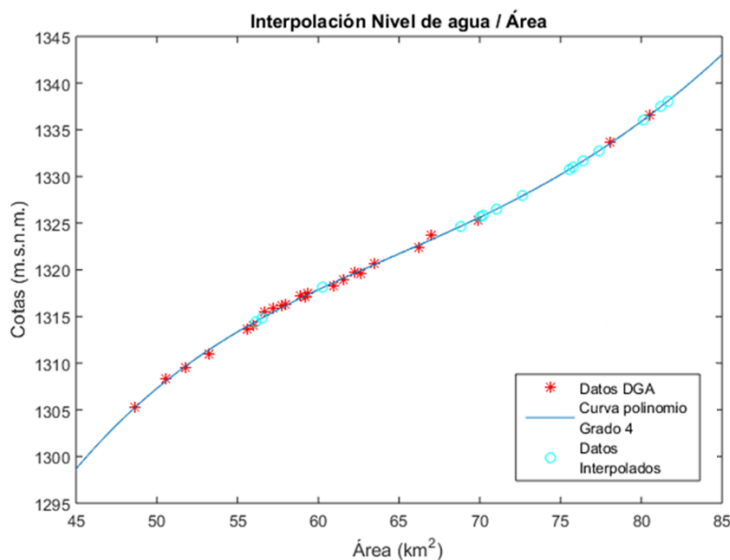


Figura 15: Interpolación de información de nivel de agua de la Laguna del Laja.

El RMS que se obtuvo mediante la utilización de la interpolación polinomial de grado cuatro fue de 0.270 m.

Se muestra en la figura 16 Los niveles de aguas obtenidos a partir de la DGA y los obtenidos por la interpolación con respecto a las fechas del estudio.

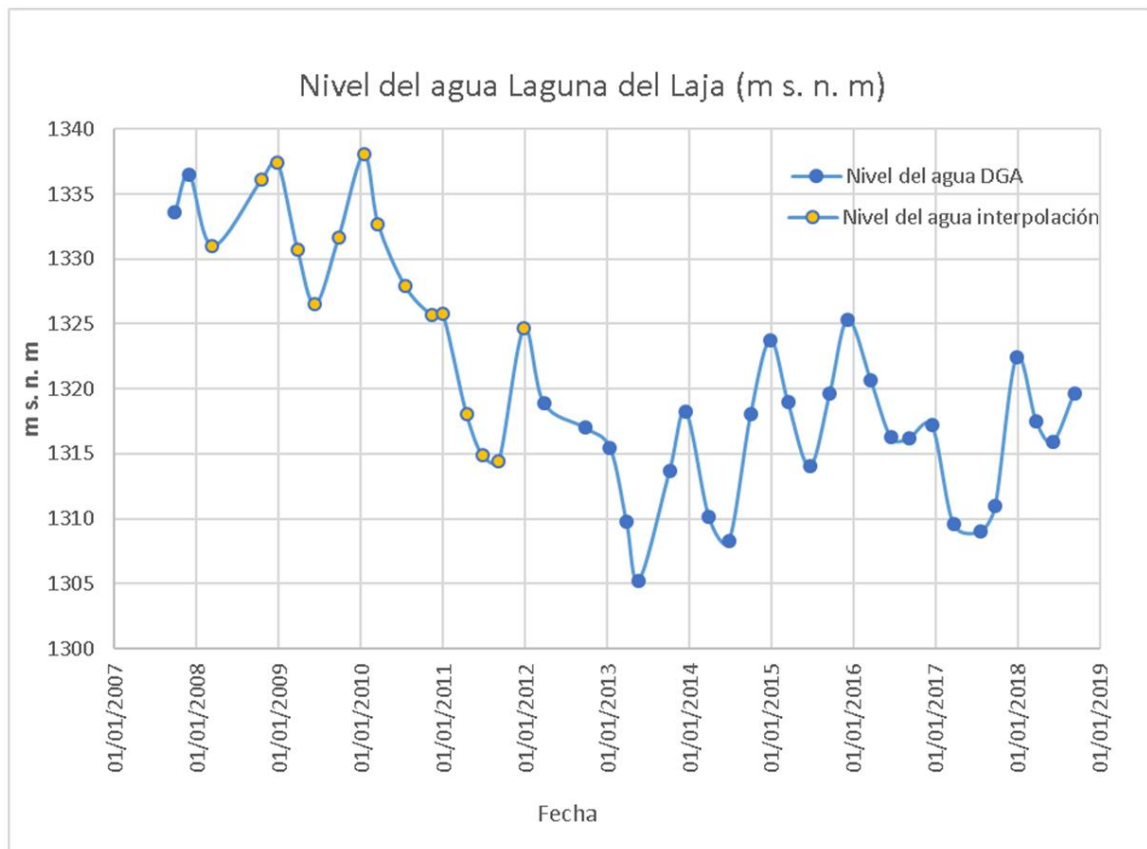


Figura 16: Nivel del agua de la Laguna del Laja dentro del periodo de estudio.

6.2. Transformación de Helmert 2D.

Los parámetros de transformación de Helmert 2D determinados a través de los 37 puntos de los dos sistemas (Anexo 1 y 2) son los siguientes.

- Factor escala: $k = 1 \pm 2,7 \cdot 10^{-16}$
- Angulo de rotación: $\theta = 9 \cdot 10^{-16} \pm 2,6 \cdot 10^{-16}$ radianes
- Traslación x: $Tx = -175 \pm 1,6 \cdot 10^{-9} m$
- Traslación y: $Ty = -341 \pm 1,6 \cdot 10^{-9} m$

Expresado en la ecuación de transformación queda de la siguiente forma:

$$x_1 = (1 \cdot \cos(9 \cdot 10^{-16})) \cdot x + (1 \cdot \text{sen}(9 \cdot 10^{-16})) \cdot y - 175$$
$$y_1 = -(1 \cdot \text{sen}(9 \cdot 10^{-16})) \cdot x + (1 \cdot \cos(9 \cdot 10^{-16})) \cdot y - 341$$

En la figura 17 se puede apreciar que a) es la vista de los puntos del modelo batimétrico de la Laguna del Laja Antes de la transformación de Helmert 2D, b) es la vista después de la transformación de Helmert 2D del modelo y c) son los puntos del modelo batimétrico de la laguna completa (imagen de referencia para a) y b)). Además, el RMS estimado para esta transformación es de 22,372 m.

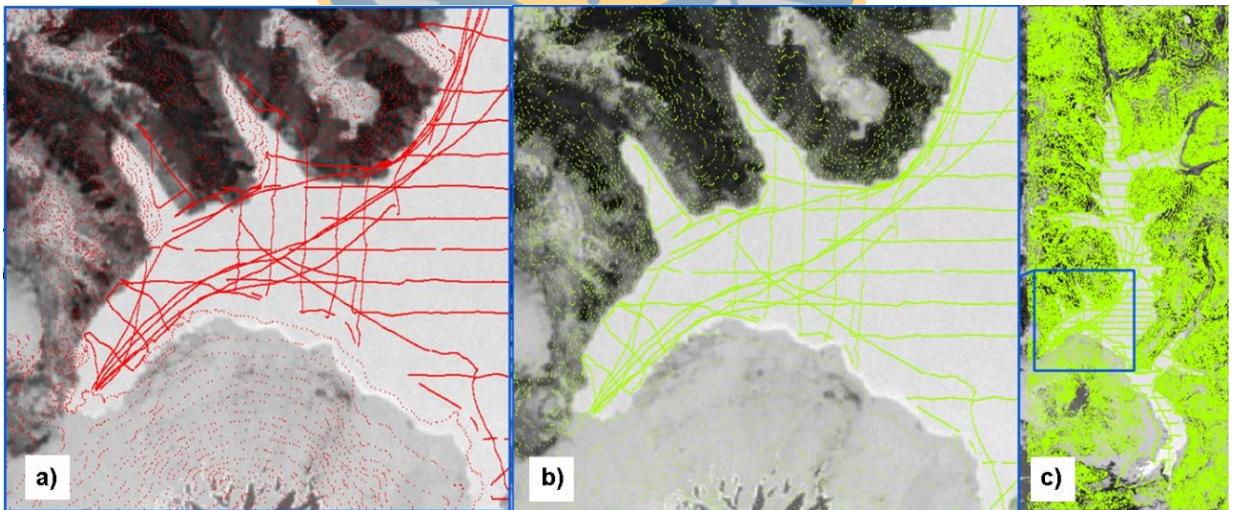


Figura 17: Antes y después de transformación de Helmert 2D. Nota: Elaboración propia

6.3. Área

Se determino el área y su respectiva variación para cada una de las fechas del estudio de la Laguna del Laja (Tabla 6, figura 18 y 21). Estos valores fueron estimados utilizando imágenes satelitales de los sensores OLI/TIR, ETM+ y TM.

Tabla 6: Área y variaciones areales de la Laguna del Laja, Periodo Septiembre 2007-2018.

Fecha	Área (km ²)	Δ Área (km ²) Variación	Fecha	Área (km ²)	Δ Área (km ²) Variación
28/09/2007	78,078 ± 0,388	0	05/10/2013	55,628 ± 0,179	6,975
30/11/2007	80,523 ± 0,411	2,445	17/12/2013	60,914 ± 0,228	5,286
13/03/2008	75,800 ± 0,367	-4,723	30/03/2014	53,301 ± 0,158	-7,612
15/10/2008	80,155 ± 0,407	4,355	27/06/2014	50,568 ± 0,132	-2,733
26/12/2008	81,194 ± 0,417	1,039	01/10/2014	61,463 ± 0,234	10,895
25/03/2009	75,549 ± 0,365	-5,645	27/12/2014	66,995 ± 0,285	5,533
12/06/2009	71,078 ± 0,323	-4,471	17/03/2015	61,526 ± 0,234	-5,469
24/09/2009	76,412 ± 0,373	5,334	21/06/2015	55,985 ± 0,183	-5,541
14/01/2010	81,631 ± 0,421	5,220	18/09/2015	62,640 ± 0,244	6,656
19/03/2010	77,350 ± 0,381	-4,281	07/12/2015	69,883 ± 0,312	7,243
17/07/2010	72,644 ± 0,337	-4,706	19/03/2016	63,467 ± 0,252	-6,416
14/11/2010	70,072 ± 0,314	-2,572	16/06/2016	57,933 ± 0,201	-5,534
01/01/2011	70,178 ± 0,315	0,106	04/09/2016	57,726 ± 0,199	-0,207
16/04/2011	60,273 ± 0,222	-9,905	16/12/2016	58,891 ± 0,210	1,165
26/06/2011	56,550 ± 0,188	-3,723	22/03/2017	51,754 ± 0,143	-7,137
07/09/2011	56,117 ± 0,184	-0,434	21/07/2017	53,001 ± 0,155	1,247
27/12/2011	68,798 ± 0,302	12,682	23/09/2017	53,206 ± 0,157	0,205
25/03/2012	62,907 ± 0,247	-5,891	26/12/2017	66,247 ± 0,278	13,040
24/09/2012	59,216 ± 0,213	-3,691	25/03/2018	59,365 ± 0,214	-6,882
14/01/2013	56,690 ± 0,189	-2,526	06/06/2018	57,166 ± 0,194	-2,199
28/03/2013	53,031 ± 0,155	-3,659	10/09/2018	62,258 ± 0,241	5,092
22/05/2013	48,652 ± 0,114	-4,378			

Nota: Elaboración Propia, 2018.

Las superficies obtenidas de la laguna se ven representadas en la figura 18, la cual presenta una tendencia a la baja de la superficie de la laguna, además se aprecia una estacionalidad entre los meses de diciembre a junio donde existe la mayor pérdida de área y entre Junio a diciembre existe una recuperación de la superficie de la laguna.

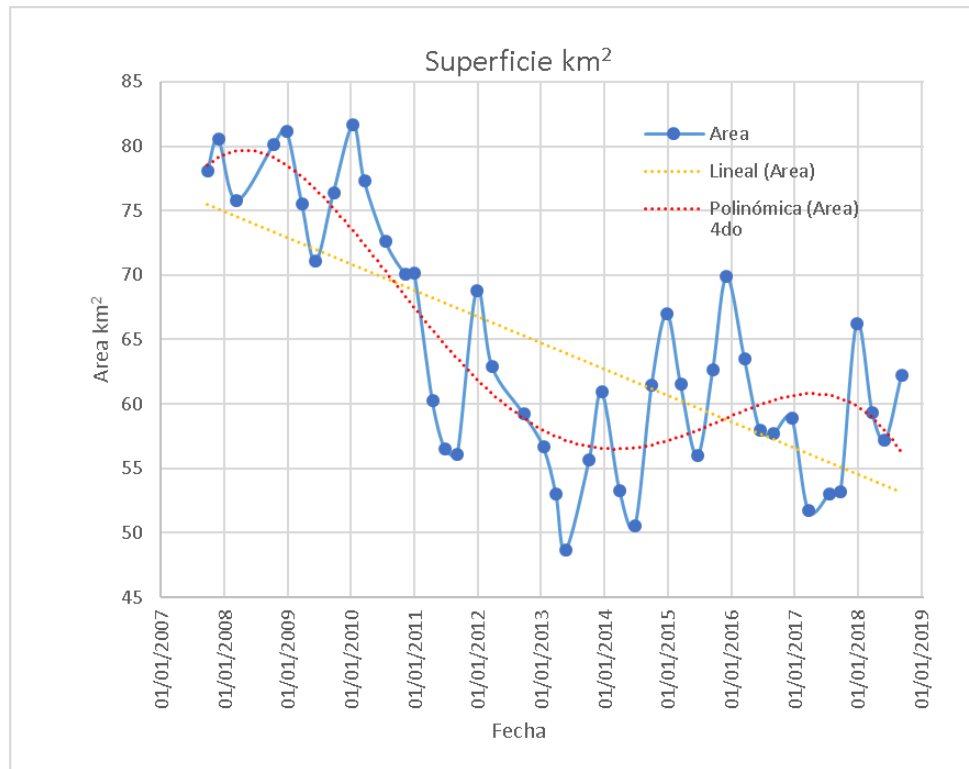


Figura 18: Área de la Laguna del Laja

De acuerdo con las superficies determinadas de la Laguna del Laja podemos destacar que la fecha del estudio que presentan menor superficie de agua corresponde al periodo Mayo 2013, alcanzando los 48,652 km² y la de mayor superficie a enero de 2010, alcanzando los 81,631 km² (Figura 19).

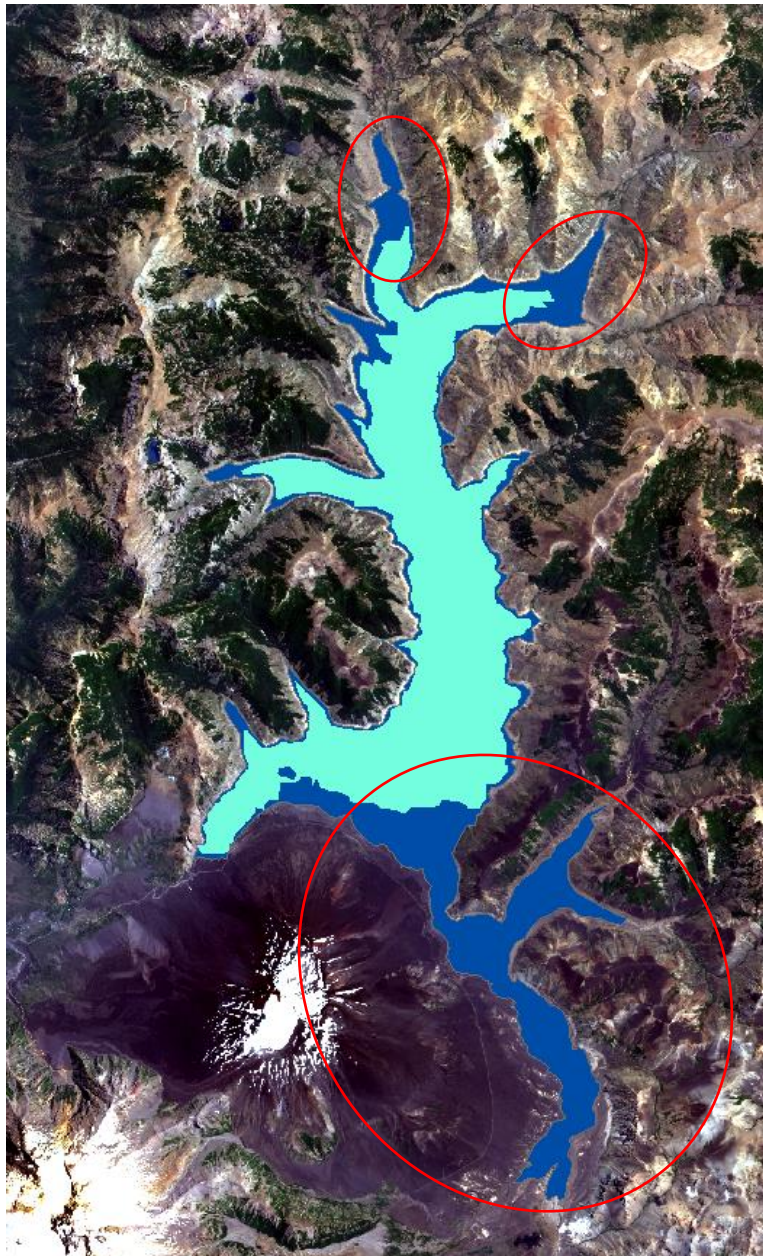


Figura 19: Superficie Máxima y mínima de la Laguna del Laja, enero 2010 (Azul, Máximo) y mayo 2013 (Celeste, mínimo). Elaboración propia.

Al hacer la comparativa de la superficie mínima y máxima de la laguna dentro del periodo de estudio, se aprecia que la zona con mayor pérdida de superficie de agua corresponde al brazo sureste de la laguna con 19,65 km², (aledaña al sector este de los pies del volcán Antuco) y los dos brazos ubicados al norte del cuerpo de agua tal como se puede apreciar en la Figura 19. Esta pérdida de superficie se puede explicar debido a una disminución de alrededor de 32,9 m del nivel de agua de la laguna, dentro del periodo de enero del 2010 hasta mayo de 2013 y a la topografía de la laguna, ya que estos brazos poseen una mayor altura con respecto al nivel medio del mar, en consecuencia, la profundidad en estas zonas es más baja que en el resto de la laguna como se aprecia en la figura 20.

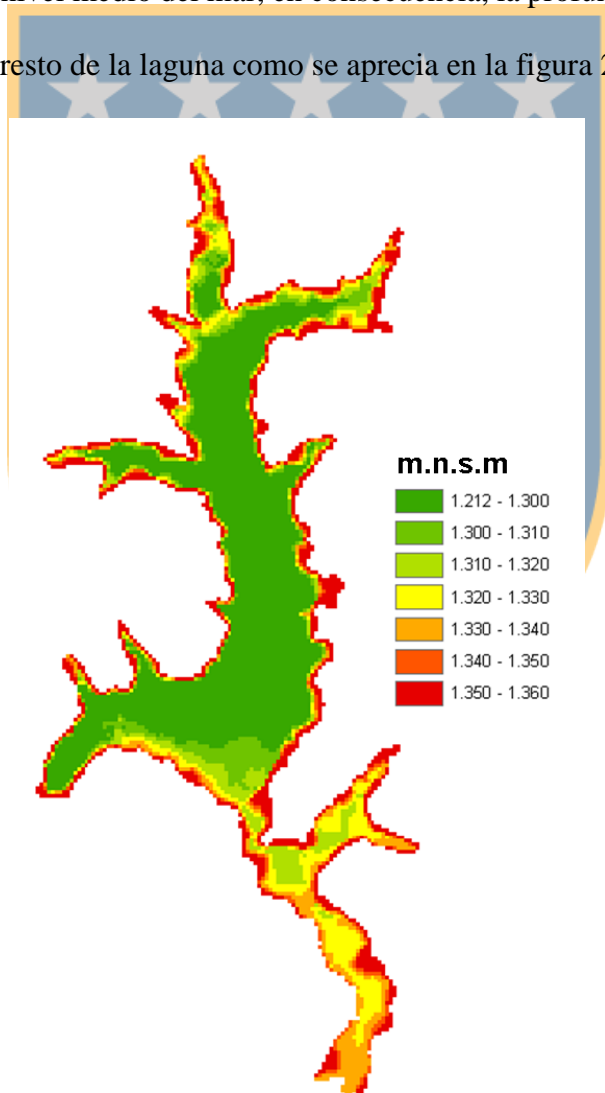


Figura 20: Altura m.n.s.m de la Laguna del Laja.

6.4. Análisis de las variaciones del área de la laguna.

En base al gráfico de la variación de área de la Laguna del Laja presentado en la figura 21, se puede observar lo siguiente:

- La laguna en el periodo de septiembre de 2007 a enero de 2010 aumento su superficie aproximadamente en 3,5 km².
- Desde enero de 2010 a septiembre de 2011 la laguna casi en su totalidad (exceptuando la variación de 0,1 km² del 01 de enero de 2011), solo tuvo variaciones negativas lo que provoco como consecuencia una pérdida de -25 km² de superficie.
- En el periodo de 3 meses de septiembre de 2011 a diciembre de 2011 la laguna recuperó aproximadamente 12,7 km² de superficie.
- Desde diciembre de 2011 hasta mayo de 2013 se observa un periodo de pérdida, con variaciones negativas en su totalidad, equivalente a -20,1 km² de área. Además, se destaca que la mayor pérdida de superficie ocurrió durante el periodo de enero de 2010 a mayo de 2013 de -33,0 Km², llegando a un mínimo de 48,6 km² de superficie.
- Desde mayo de 2013 hasta diciembre de 2015 la laguna tuvo un comportamiento estacional, en el cual hubo una recuperación de superficie de 21,2 km².
- En el periodo de diciembre de 2015 a julio de 2017 predominaron las variaciones negativas, equivalentes aproximadamente a -18,1 km² de superficie de la laguna.
- Desde julio de 2017 hasta septiembre de 2018 la laguna recuperó aproximadamente 10,5 km².

Al analizar las variaciones de la superficie de la laguna dentro del periodo de estudio se observó una perdida equivalente a -15,8 km².

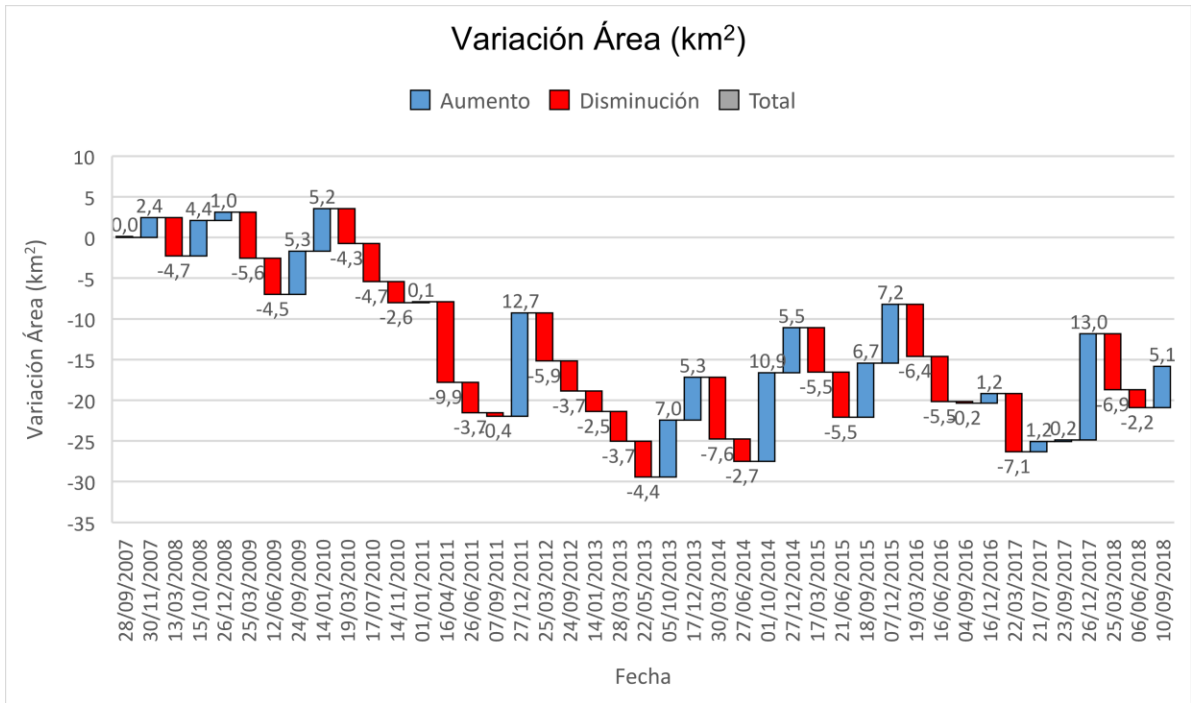


Figura 21: Variaciones de área de la Laguna del Laja



6.5. Volumen

A continuación, se presenta el volumen y sus respectivas variaciones (tabla 7, figura 22 y 23). Estos valores fueron estimados utilizando el modelo batimétrico, las digitalizaciones de las superficies del cuerpo de agua y el nivel de agua de la laguna.

Tabla 7 Volumen y Variaciones de la Laguna del Laja, Periodo Septiembre 2007-2018

Fecha	Volumen (km ³)	Δ Volumen (km ³) Variación	Fecha	Volumen (Millones de m ³)	Δ Volumen (km ³) Variación
28/09/2007	3,690	0	05/10/2013	2,454	0,424
30/11/2007	3,899	0,208	17/12/2013	2,706	0,252
13/03/2008	3,508	-0,391	30/03/2014	2,272	-0,434
15/10/2008	3,868	0,360	27/06/2014	2,176	-0,095
26/12/2008	3,970	0,102	01/10/2014	2,695	0,519
25/03/2009	3,491	-0,478	27/12/2014	3,031	0,336
12/06/2009	3,206	-0,285	17/03/2015	2,745	-0,286
24/09/2009	3,552	0,346	21/06/2015	2,475	-0,271
14/01/2010	4,014	0,462	18/09/2015	2,786	0,311
19/03/2010	3,625	-0,389	07/12/2015	3,134	0,348
17/07/2010	3,298	-0,327	19/03/2016	2,844	-0,289
14/11/2010	3,155	-0,143	16/06/2016	2,594	-0,251
01/01/2011	3,159	0,005	04/09/2016	2,591	-0,003
16/04/2011	2,696	-0,463	16/12/2016	2,645	0,055
26/06/2011	2,518	-0,178	22/03/2017	2,242	-0,403
07/09/2011	2,494	-0,024	21/07/2017	2,218	-0,024
27/12/2011	3,088	0,594	23/09/2017	2,244	0,026
25/03/2012	2,745	-0,343	26/12/2017	2,951	0,707
24/09/2012	2,638	-0,107	25/03/2018	2,663	-0,289
14/01/2013	2,550	-0,087	06/06/2018	2,574	-0,089
28/03/2013	2,253	-0,297	10/09/2018	2,787	0,213
22/05/2013	2,030	-0,223			

Nota: Elaboración Propia, 2018.

Los volúmenes presentados en la figura 22 muestran una tendencia a la baja con respecto a la cantidad de volumen del recurso hídrico durante el periodo en estudio. En este lapso de tiempo la laguna presentó su nivel más alto de almacenamiento de agua en enero de 2010, superando los 4,014 km³, en cambio, el periodo de mayor déficit de agua corresponde al mes de Mayo del 2013, con 2,030 km³ de volumen de agua que corresponde aproximadamente al -50% respecto al máximo del recurso hídrico.

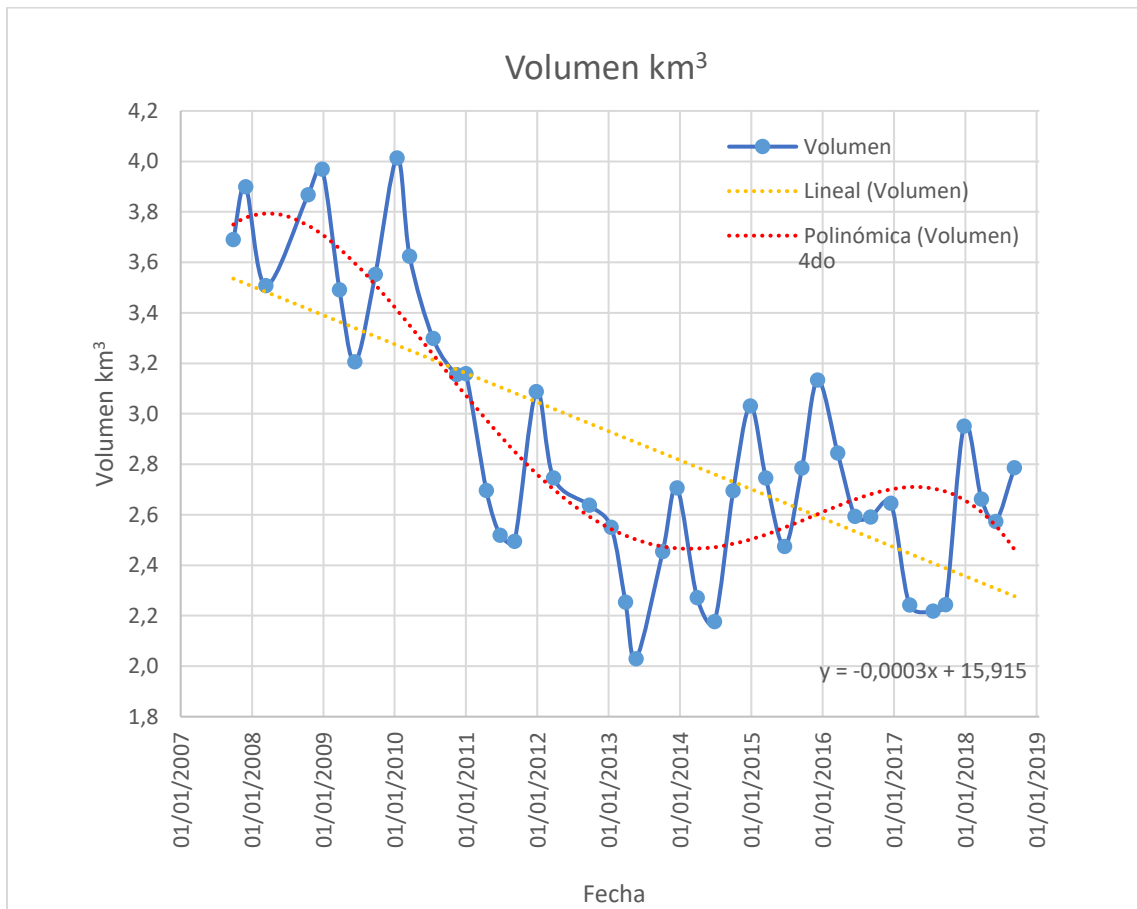


Figura 22 Volumen del cuerpo de agua Laguna del Laja

6.6. Análisis de las variaciones del volumen de agua de la laguna

Respecto al gráfico de la figura 23 de las variaciones de volumen del cuerpo de agua de la Laguna del Laja, se observa lo siguiente:

- En el periodo de septiembre de 2007 hasta enero de 2010 aumentó el volumen de agua de la laguna en $0,32 \text{ km}^3$.
- En el periodo de enero de 2010 a septiembre de 2011 donde predominaron las variaciones negativas, lo que tuvo como consecuencia un descenso de la cantidad de agua almacenada en la laguna de $-1,52 \text{ km}^3$.
- En el periodo de septiembre de 2011 a diciembre de 2011 la laguna recupero aproximadamente $0,59 \text{ km}^3$ de volumen de agua.
- En el periodo de diciembre de 2011 hasta mayo de 2013 se observan sólo variaciones negativas en su totalidad del volumen de agua, equivalente a $-1,06 \text{ km}^3$.
- Se destaca que el periodo con mayor pérdida de volumen de agua de la laguna ocurrió entre enero de 2010 a mayo de 2013 equivalente a $-1,98 \text{ km}^3$.
- En el periodo de mayo de 2013 hasta diciembre de 2015 el comportamiento de la laguna fue estacional, pero con un aumento de volumen mayor, lo que llevo a una recuperación de volumen de agua de $1,10 \text{ km}^3$.
- En el periodo de diciembre de 2015 a julio de 2017 predominaron las variaciones negativas, equivalentes aproximadamente a $-0,89 \text{ km}^3$ del volumen del recurso hídrico de la laguna.
- En el periodo de julio de 2017 a septiembre de 2018 la laguna recuperó aproximadamente $0,54 \text{ km}^3$ de volumen de agua.

Al estudiar las variaciones del volumen de agua de la Laguna del Laja dentro del periodo de estudio se observa una -24,5% del recurso hídrico, equivalente a $-0,904 \text{ km}^3$.

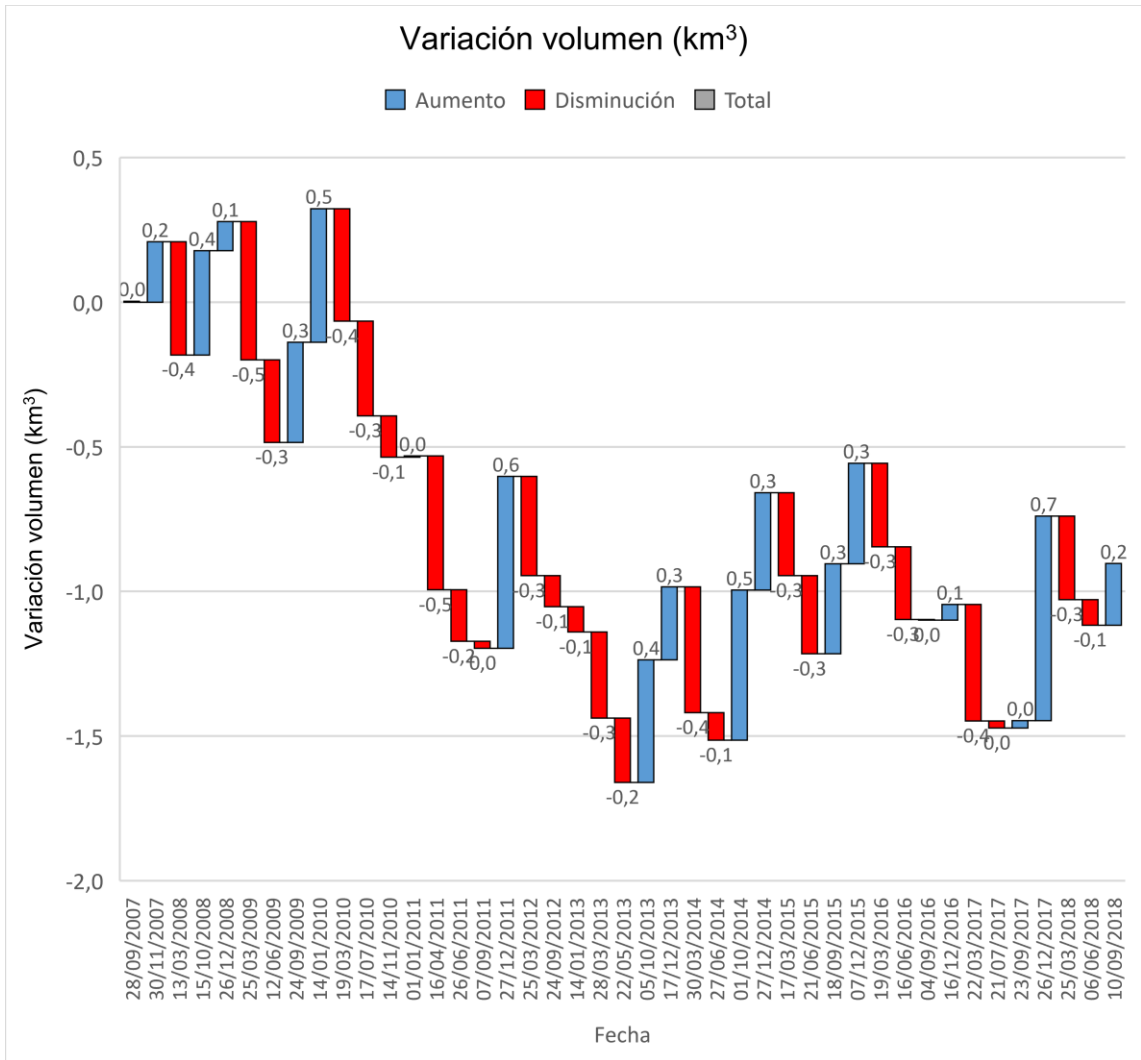


Figura 23 Variaciones volumétricas del cuerpo de agua Laguna del Laja

6.7. Comparación con otro estudio

En comparación con otro estudio realizado por la estudiante del Instituto Tecnológico de Karlsruhe (Alemania) Svea Krikau, realizado en el año 2018; titulado Estimación de la automatización para el cálculo de la superficie de la Laguna del Laja basado en datos Landsat y Sentinel. (del alemán *Abschätzung der Automatisierbarkeit der Flächenbilanzierung der Laguna del Laja anhand von Landsat und Sentinel-Daten*) la tendencia estimada por el estudio de Krikau sigue las tendencias muy similares a las determinadas por este estudio donde los periodos con mayor superficie se encuentran entre los años 2007 y hasta inicios del año 2010, seguido por un gran descenso de superficie entre el 2010 y mediados del 2013, y por último el periodo de mediados de 2013 y finales de 2018 donde se recupera parte de lo perdido en este periodo.

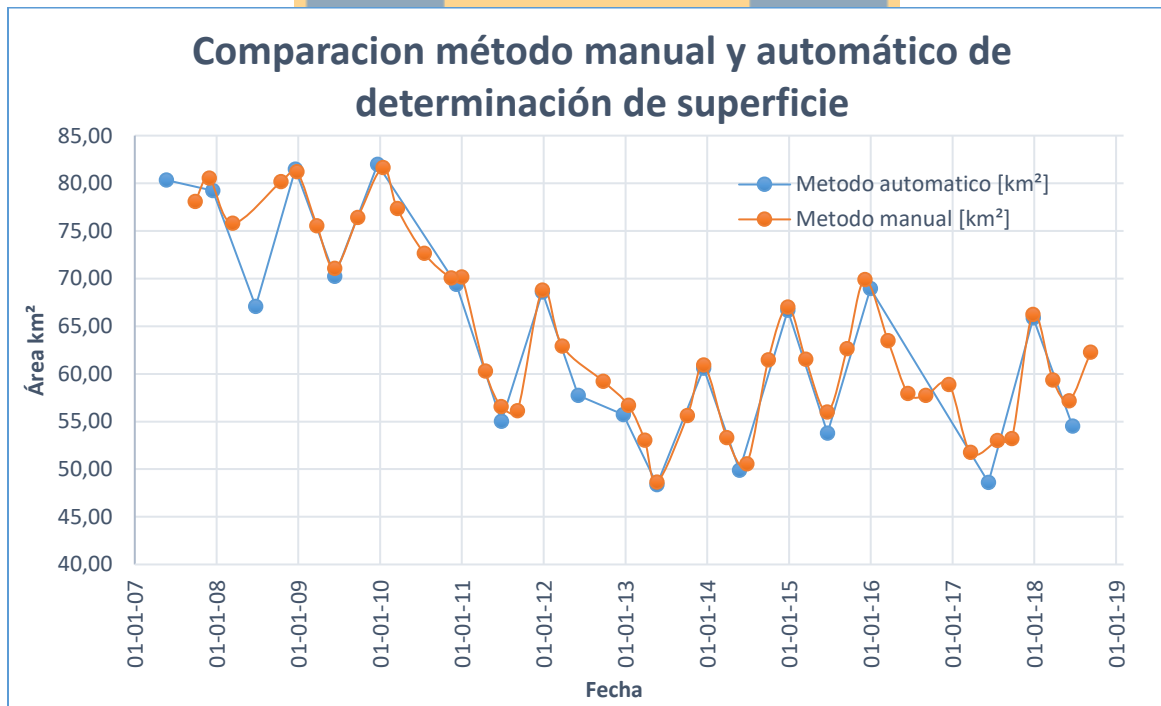


Figura 24: Comparación método automático (Krikau) y manual para la digitalización de la superficie de la Laguna del Laja

Los resultados de área son semejantes (tabla 8 y figura 24 y 25), teniendo una diferencia promedio entre áreas calculadas en los mismos meses de 0.68 Km², las diferencias se explican por la metodología utilizada por Svea Krikau debido a que no hay corrección manual de la superficie generada, utilizando solo un método automático para esta estimación.

Tabla 8: diferencias entre método automático y manual para la digitalización de la superficie de la Laguna del

Fecha	Método automático (km ²)	Fecha	Método manual (km ²)	Diferencia [km ²]	Satélite
2018-06-21	54,52	2018-06-06	57,17	2,64	Landsat 8
2017-12-27	65,86	2017-12-26	66,25	0,39	Landsat 8
2015-12-31	68,97	2015-12-07	69,88	0,92	Landsat 8
2014-12-28	66,66	2014-12-27	67,00	0,34	Landsat 8
2013-12-16	60,60	2013-12-17	60,91	0,31	Landsat 8
2013-05-22	48,37	2013-05-22	48,65	0,28	Landsat 7
2011-12-27	68,58	2011-12-27	68,80	0,22	Landsat 7
2011-06-27	56,22	2011-06-26	56,55	0,33	Landsat 5

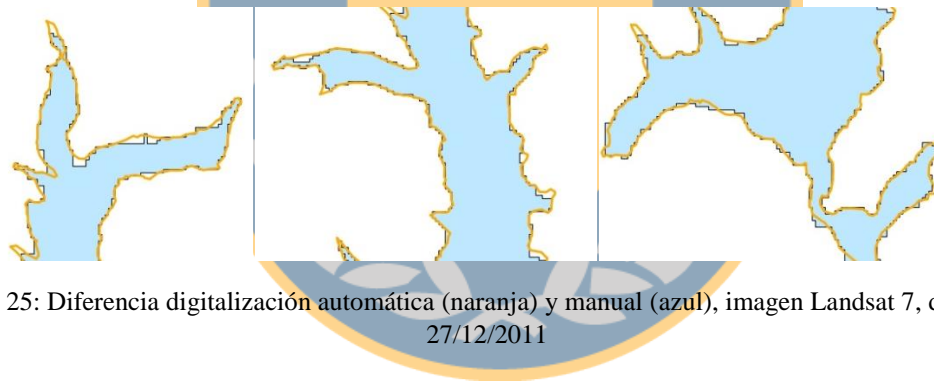


Figura 25: Diferencia digitalización automática (naranja) y manual (azul), imagen Landsat 7, de la fecha 27/12/2011

7. Conclusiones

Utilizando imágenes satelitales de las misiones Landsat 5, 7 y 8, en conjunto de distintas técnicas para la identificación de cuerpos de agua, como NDWI, combinaciones de bandas espectrales y digitalización manual, se obtuvo la cuantificación del área o superficie de la Laguna del Laja desde septiembre de 2007 hasta septiembre de 2018. Los resultados obtenidos presentan una importante tendencia a la baja comparando las cifras iniciales (Septiembre 2007) con respecto a las cifras finales (Septiembre 2018), alcanzando aproximadamente $-15,8 \text{ Km}^2$ de superficie, esta cantidad se representa en el $-20,3 \%$ desde el inicio del estudio. Además, cabe mencionar que la alta variabilidad en los resultados obtenidos, donde destaca la importante diferencia existente entre el valor máximo y mínimo de superficie de la laguna en el periodo de estudio, de un $-40,3\%$ de superficie, equivalente a $-32,9 \text{ km}^2$.

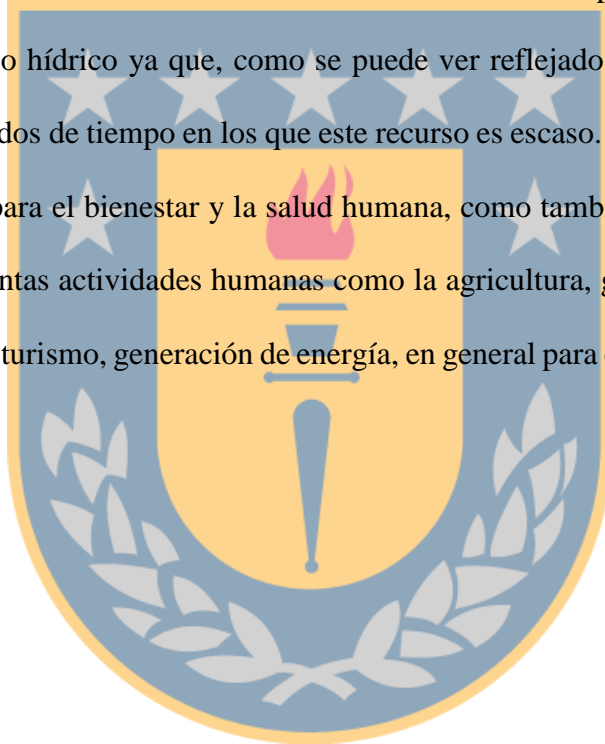
Utilizando las áreas digitalizadas de la Laguna del Laja, las alturas de nivel de agua de esta y aprovechando el uso del modelo batimétrico correspondiente, se obtuvo la estimación de los cambios en el volumen, los resultados obtenidos al igual que el área, presentan una importante tendencia a la baja comparando las cifras iniciales y finales, alcanzando $-0,903 \text{ km}^3$ en la cantidad del recurso hídrico, esta cantidad se encuentra representada en un $-24,5 \%$ desde el inicio del estudio. Además, de una importante diferencia de $-49,4\%$ entre el valor máximo y mínimo del volumen de agua en sólo tres años y medios.

Al analizar los resultados de las variaciones de área y volumen de la Laguna del Laja en los últimos 11 años, se puede apreciar un comportamiento similar entre estas dos variables, donde se destaca que en un periodo de tres años y medios (desde enero de 2010

hasta mayo de 2013) existe una pérdida constante o variación negativa del volumen y área de la laguna, lo que llevó a la laguna a perder alrededor de 2 km³ de agua y más de 32 km² de superficie.

El contar con información batimétrica de los lagos, lagunas y embalses es de vital importancia para el control y monitoreo del recurso hídrico del país, sobre todo en zonas donde este recurso es escaso o presenta tendencias a la baja, para una administración más eficiente de estos recursos hídricos.

Para finalizar, se estima necesario crear una conciencia en las personas, sobre el uso sustentable del recurso hídrico ya que, como se puede ver reflejado en los resultados de este estudio hay periodos de tiempo en los que este recurso es escaso. El uso sustentable es de gran importancia para el bienestar y la salud humana, como también para el equilibrio del ecosistema y distintas actividades humanas como la agricultura, ganadería, forestales, procesos industriales, turismo, generación de energía, en general para el desarrollo del país.



8. Referencias

- Büttner, O. Rahn, K. Urrutia, R. Valdovinos, C (2018): Batimetría del lago Laja (Laguna del Laja, Chile): datos de la encuesta procesada de 2001. *PANGEA* , 7
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial - 3ª Edición revisada REF.REVISTA/LIBRO: Madrid, Rialp.
- Chuvieco, E. (2016). Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Enviromental Approach. New York: CRC Press.
- Días P., Jaque E., Ojeda C. (2018). Presión hídrica en ambientes lacustres de alta montaña: entre el cambio climático y el desarrollo energético. Laguna del Laja, Chile. *Diálogo Andino*. N° 55, 2018. Páginas 143-158. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rda/n55/0719-2681-rda-55-00143.pdf>
- Dirección de obras Hidráulicas (DOH), (2017). Ministro Undurraga destaca histórico acuerdo para el uso eficiente y sustentable de aguas del Lago Laja. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado de <http://www.doh.gov.cl/Noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=583>
- EOS Data Analytics Inc. 2018. Land and Water bands used in the satellite imagery. Recuperado de <https://eos.com/land-water/>
- Garreaud, D. (2014). El mega sequia 2011-2013: Aspectos climáticos regionales. Recuperado de: http://dgf.uchile.cl/rene/DIV/sequia_clima_regional.pdf
- Lira, J. (2006). Segmentation and morphology of open water bodies from multispectral images, *International Journal of Remote Sensing* 27(18):4015-4038 DOI: 10.1080/01431160600702384

- McFeeters, S.K. (1996). The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1425-1432
- Ministerio de Obras Públicas, (MOP), (2013). *Chile Cuida su agua Estrategias Nacional de Recursos Hídricos 2013-2025*. Gobierno de Chile. Recuperado de https://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf.
- Pérez, J. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*, Mérida, España, Universidad de Extremadura, recuperado de: <http://redgeomatica.rediris.es/cartoprofesores/Fotogrametria/Apuntes%20de%20Fotogrametr%92a%20II.pdf>
- Peter Wasmeier (2018). Geodetic Transformations <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696geodetictransformations>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 21, 2018.
- Polidorio, A. Garcia, A. Nobuhiro N., Bueno M. (2005). Segmentação de corpos d'água em imagens multiespectrais e temporais usando watershed com marcadores automaticamente definidos. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia. INPE, p. 4249-4257. Brasil, 16-21 abril 2005.
- Pringle, M., Schmidt, M., Muir, J. (2009). Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 654-664, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.001.
- Puertas, J. (2016). *Efecto del convenio de riego del sistema hidroeléctrico Laja sobre la programación de largo plazo del sistema interconectado central de Chile* (Memoria para optar al título de ingeniero civil). Universidad de Chile. Recuperado de

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139279/Efecto-del-convenio-de-riego-del-sistema-hidroelectrico-Laja-sobre-la-programacion-de-largo-plazo.pdf?sequence=1>

Rebolledo, S. (2010), Análisis de la significancia de modelos de transformación bidimensional y modelo de similaridad 3d para la compatibilización de bases cartográficas a SIRGAS, universidad tecnológica metropolitana Santiago, Chile.

Sarp, G. Ozcelik M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. Journal of Taibah University for Science Volume 11, Issue 3, May 2017, Pages 381-391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.216.04.005>

Scaramuzza, P. Micijevic, E. Chander, G.(2004). SLC Gap-Filled Products Phase One Methodology, USGS, recuperado de: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf

Urrutia, R. Parra, O. (2012). Cuerpos lacustres de la región Del Biobío. Centro EULA-Chile Universidad de Concepción. Recuperado de: http://www.eula.cl/lagunas_urbanas/doc/Talleres/CUERPOS%20LACUSTRES%20ODE%20LA%20REGIÓN%20DEL%20BIOBIO.pdf

9. Anexos

9.1. Anexo 1 (Sistema de coordenadas inicial).

Sistema de coordenadas inicial		
Numero	Este	Norte
0	300932	5878198
1	300132	5875424
2	297169	5875165
3	296853	5870958
4	298980	5871961
5	297793	5869866
6	298717	5867212
7	298346	5864175
8	296914	5861130
9	296900	5859197
10	300768	5861882
11	300189	5859700
12	301634	5859198
13	298465	5857722
14	300785	5854159
15	299607	5851307
16	298491	5852001
17	296854	5858058
18	291927	5862394
19	290162	5860926
20	291431	5863429
21	290750	5865249
22	292826	5864169
23	292528	5865934
24	293569	5864512
26	295357	5866723
27	295781	5869147
28	293452	5870833
29	291871	5870403
30	290196	5871358
31	294900	5871396
32	294574	5873129
33	293935	5875777
34	294451	5878893
35	294922	5881174
36	295826	5875994
37	298417	5876614

9.2. Anexo 2 (Sistema de coordenadas nuevo).

Sistema de coordenadas nuevo		
Numero	Este	Norte
0	300757	5877857
1	299957	5875083
2	296994	5874824
3	296678	5870617
4	298805	5871620
5	297618	5869525
6	298542	5866871
7	298171	5863834
8	296739	5860789
9	296725	5858856
10	300593	5861541
11	300014	5859359
12	301459	5858857
13	298290	5857381
14	300610	5853818
15	299432	5850966
16	298316	5851660
17	296679	5857717
18	291752	5862053
19	289987	5860585
20	291256	5863088
21	290575	5864908
22	292651	5863828
23	292353	5865593
24	293394	5864171
26	295182	5866382
27	295606	5868806
28	293277	5870492
29	291696	5870062
30	290021	5871017
31	294725	5871055
32	294399	5872788
33	293760	5875436
34	294276	5878552
35	294747	5880833
36	295651	5875653
37	298242	5876273