

***Proyecto FIC Más Azul:***

Aplicación e integración de tecnologías de información y nuevas herramientas biotecnológicas, para el monitoreo colaborativo de lagos, que asegure la conservación del recurso hídrico, resguarde la salud humana, animal y contribuya al desarrollo integral de la Región.

## **INFORME ETAPA #1**

**Objetivo 4:** Evaluar la utilización de la teledetección como técnica para el monitoreo de calidad de agua de cuerpos lacustres.

**Autores:** MSc. -Ing. Manuel Castro.  
MSc. Patricio Acevedo.

### **ETAPA 1:**

Informe de satélites comerciales y no comerciales, sensores, bandas y otros aspectos técnicos (resoluciones Temporal, Radiométrica, etc.) a ser considerados en la elaboración del árbol de decisión para lograr el monitoreo de calidad del agua del Lago Llanquihue.



<b>Tabla de Contenido</b>	<b>Páginas</b>
INTRODUCCIÓN	1
DEFINICIONES	2
<b>RESOLUCIÓN ESPACIAL</b>	<b>2</b>
<b>RESOLUCIÓN ESPECTRAL</b>	<b>2</b>
<b>RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA</b>	<b>2</b>
<b>RESOLUCIÓN TEMPORAL</b>	<b>2</b>
<b>COMBINACIONES ESPECTRALES</b>	<b>2</b>
<b>REFLECTANCIA</b>	<b>2</b>
VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE LOS SENSORES REMOTOS	3
SENSORES SATELITALES ORIENTADOS AL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA	4
<b>MISIONES HISTÓRICAS</b>	<b>4</b>
A) NIMBUS-7/CZCS	4
B) ADEOS/OCTS	4
C) ORBVIEW-2/SEAWIFS	4
D) ENVISAT/MERIS	5
E) MIR/HICO	5
F) SAC-D AQUARIUS	5
<b>MISIONES ACTIVAS</b>	<b>6</b>
A) AQUA Y TERRA/MODIS	6
B) COMS/GOCI Y GEOKOMPSAT-2B/GOCI II	6
C) SENTINEL-3/OLCI	7
D) JPSS-1 Y SUOMI-NPP/VIIRS	7
<b>CARACTERÍSTICAS DE SENSORES SATELITALES</b>	<b>8</b>
CONCLUSIONES	11
REFERENCIAS	12
ANEXO 1	13
<b>SENSOR MODIS</b>	<b>13</b>
<b>SENSOR OLCI</b>	<b>14</b>
<b>SENSOR VIIRS</b>	<b>14</b>

## Introducción

Monitorear la calidad del agua en lagos es clave para mantener agua segura para beber, bañarse, pescar y actividades agropecuarias. Las tendencias a largo plazo y los cambios a corto plazo son indicadores de salud ambiental y cambios en el área de captación de agua. El monitoreo satelital ayuda a cubrir sistemáticamente una gran cantidad de cuerpos de agua, lo que reduce las necesidades de infraestructura de monitoreo in-situ en áreas de difícil acceso.

El estado deficiente en la calidad de las aguas es un problema fundamental debido a que puede ocasionar la eutrofización de las aguas, ocasionado un aumento de la turbidez y el cambio en el color del agua, esto es debido a un aumento en la abundancia de fitoplancton, lo cual es perjudicial (Moncayo and Bueno, 2016).

La turbidez de un lago describe la claridad del agua o si la luz del sol puede penetrar partes más profundas del lago. La turbidez a menudo varía estacionalmente, tanto con la descarga de los ríos como con el crecimiento de fitoplancton (algas y cianobacterias). El índice de estado trófico es un indicador de la productividad de un lago en términos de fitoplancton e indirectamente (en escalas de tiempo más largas) refleja el estado de eutrofización de una masa de agua. La eutrofización se define como el enriquecimiento del agua en sustancias nutritivas que generalmente conduce a cambios tales como el aumento de la producción de algas y otras plantas acuáticas y el deterioro de la calidad del agua y ecosistema (OECD, 1982).

Los sensores remotos también se pueden utilizar para producir imágenes de color verdadero combinando las bandas del espectro visible. La resolución espectral de sensores diseñados para el monitoreo de la calidad de las aguas, tales como MODIS a bordo del Satélite AQUA y TERRA, es sin lugar a dudas la más adecuada, pero su resolución espacial puede no ser la mejor para aplicaciones especialmente en lagos, ya que es aproximadamente de 1000 m. Al respecto, es posible hacer uso de sensores no necesariamente diseñados para obtener parámetros relacionados con la calidad de las aguas, pero que permiten obtener información con una resolución espacial mayor (30 m). Como ejemplo el sensor Landsat-8/OLI ha sido usado para monitorear variables de calidad de agua como transparencia, partículas suspendidas en el agua y clorofila-a (Doña et al. 2014; Moncayo y Bueno, 2016; Briceño et al., 2018; Huovinen et al., 2019).

La Teledetección Satelital como técnica de observación espacial, temporal, y espectral permite realizar mediciones de la superficie terrestre sin tener contacto con ella. Es por ende que existe una diversidad de sensores que nos brindan información, permitiendo realizar un seguimiento temporal (Domínguez et al., 2009).

El objetivo de este trabajo es evaluar la utilización de la Teledetección Satelital como técnica para el monitoreo de calidad de agua en lagos de la zona sur de Chile. Con el fin de orientar la búsqueda de cuáles son las plataformas y/o sensores satelitales más adecuados para las diferentes aplicaciones, como también la disponibilidad de imágenes, costos asociados y sensibilidad de los modelos en estimaciones de la calidad de agua.

## Definiciones

Es posible clasificar el sistema completo de un sensor remoto (satelital) en base a su resolución (discriminación) para detectar la información proveniente desde la superficie terrestre, permitiendo que un usuario pueda elegir las imágenes satelitales que se ajusten a los requerimientos del estudio a ser realizado (Campbell, 1987).

### Resolución Espacial

Corresponde al mínimo detalle espacial que capta el sensor. Es una función de la combinación del sistema óptico, el detector y la altitud de la plataforma utilizada.

### Resolución Espectral

Se define como la cantidad y ancho de los rangos del espectro electromagnético que capta el sensor. Estos rangos reciben el nombre genérico de bandas.

### Resolución Radiométrica

Es la sensibilidad del detector para diferenciar pequeños cambios en la energía electromagnética incidente en él. Corresponde al número de niveles digitales que permite el conversor análogo-digital del sistema o posible de valores que pueden tomar los datos. Computacionalmente la Resolución Radiométrica se expresa como el número de bits disponibles para representar los diferentes niveles de energía registrados análogamente. Por ejemplo, en el caso de una resolución de 8 bits (1 byte), los niveles digitales de la imagen podrán tomar valores entre 0 y 255, mientras que, con 10 bits los valores podrán variar entre 0 y 1023.

### Resolución Temporal

Esta resolución no depende de las características del sensor, sino de la plataforma (satélite) en que está instalado. Se define como la frecuencia de pasadas del satélite sobre un mismo punto, o bien, cuánto tiempo debe transcurrir para que se pueda obtener de nuevo una imagen de una misma área.

### Combinaciones Espectrales

En base a la suma, diferencia, cociente u otra combinación lineal entre dos o más bandas de un sensor satelital es posible obtener diferentes combinaciones o índices espectrales. En particular, los índices espectrales permiten extraer la información de la superficie observada, minimizando la influencia de otros factores externos, tales como las propiedades ópticas y la radiancia solar (Sobrino, 2000). El índice de espectral ideal ha sido descrito por (Jackson et. al. 1981) como “aquel particularmente sensible a la cubierta observada, insensible al brillo y color del suelo, y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores ambientales y la geometría de iluminación y de observación”. Evidentemente, el índice de espectral ideal no existe y los que se encuentran disponibles en la literatura son diversas aproximaciones al mismo.

### Reflectancia

Medida de la capacidad de una superficie para reflejar energía electromagnética en una determinada longitud de onda. Es la razón existente entre el flujo reflejado y el incidente sobre dicha superficie. Aplicado al espectro visible, suele hablarse de albedo.

## Ventajas y limitaciones del uso de los sensores remotos

El uso de los sensores remotos en los últimos años ha sido un fuerte aporte en el desarrollo de muchas ciencias debido a las ventajas que ofrecen (Chuvieco 2002, Schmugge et al. 2002, Platnick et al. 2003):

- ✓ Una visión panorámica y cobertura total de la superficie terrestre donde se obtienen imágenes de áreas con difícil acceso.
- ✓ Homogeneidad en la toma de datos, proporcionando un formato digital de las imágenes lo que facilita su procesamiento.
- ✓ Un amplio conocimiento del espectro proporcionando información de las radiaciones de las regiones no visibles tales como del infrarrojo cercano, medio y térmico, como también en las microondas).
- ✓ Permiten clasificar diferentes tipos de cobertura que existentes sobre un terreno (vegetación, suelos, agua).
- ✓ Permiten obtener series de datos que proporcionan información periódica acerca de su variación espacial y temporal, facilitando el proceso de monitoreo.
- ✓ La información satelital además de reducir el tiempo invertido en las investigaciones reduce también los costos en comparación con el uso de las fotografías aéreas. En diversos casos, países que cuentan con satélites en órbita ofrecen información gratuita de sus imágenes, disponibles en los sitios web de sus respectivas agencias.

Sin embargo, el uso de sensores remotos también presenta ciertas limitaciones (Villa et al. 2009):

- Su uso en diferentes áreas de investigación es sólo complementario a los métodos tradicionales, es decir que de ninguna forma los sustituye.
- Todo trabajo realizado con el uso de sensores remotos precisa de datos de campo para su calibración y validación.
- El acceso a gran parte de las imágenes es de costos elevados.
- La disponibilidad de datos de sensores multiespectrales puede ser afectada por Interferencias atmosféricas como es la presencia de nubes.
- Complejidad de las técnicas a utilizar y la capacitación de personal especializado.

## Sensores Satelitales orientados al estudio de la calidad de agua

Desde finales de la década de los noventa y en base a la información obtenida desde plataformas satelitales (misiones espaciales), se han monitoreado las características fisicoquímicas de los océanos, mares y lagos, lo que usualmente ha sido llamada el color de océano (ocean color). En el caso de las características físicas se consideran primordialmente las propiedades ópticas de los océanos.

La primera misión espacial dedicada específicamente a este tema fue la del satélite Nimbus-7, con el sensor (instrumento) Coastal Zone Color Scanner Experiment (CZCS). El periodo útil de este sensor fue desde octubre de 1978 a junio de 1986.

Si bien no fue el primero históricamente, el satélite OrbView-2, con el sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor) es sin lugar a dudas una de las más conocidas misiones espaciales destinada al monitoreo de los océanos. El SeaWiFS estuvo activo desde septiembre de 1997 a diciembre de 2010.

Se presenta a continuación una lista de las diferentes misiones espaciales que han permitido el seguimiento de los cuerpos de agua a nivel mundial.

### Misiones Históricas

#### a) Nimbus-7/CZCS (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/czcs/>)

Esta misión se desarrolló entre el 30 de octubre de 1978 al 22 de junio de 1986. El instrumento utilizado fue el Coastal Zone Color Scanner Experiment (CZCS), diseñado específicamente con el objetivo de realizar mediciones específicas del color de océanos. Para esto, contaba con 4 bandas en el rango visible centradas en los 443, 520, 550 y 670 nm, con anchos de banda de 20 nm.

#### b) ADEOS/OCTS (<https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI2/adeos/Project/Octs.html>)

Periodo de operaciones desde el 01 de noviembre de 1996 al 30 de junio de 1997. Como parte de los instrumentos a bordo del satélite Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), estaba el Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS). El OCTS correspondió a un radiómetro óptico con 8 bandas que cubre las regiones del visible e infrarrojo cercano, y 4 bandas en el infrarrojo térmico. La resolución espacial en el nadir era de 700 m.

#### c) OrbView-2/SeaWiFS (<https://ioccg.org/sensor/seawifs/>)

El sensor SeaWiFS fue diseñado para recolectar datos relacionados con el color de agua (ocean color), a través de 8 bandas espectrales cubriendo un rango desde los 412 a 865 nm, con una resolución espacial global de 4 km (GAC) y local de 1 km (LAC). El periodo de operación del SeaWiFS fue desde el 04 de septiembre de 1997 al 11 de diciembre de 2010.

d) Envisat/MERIS (<https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris>)

El Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) contaba con un espectrómetro de imágenes cubriendo el rango espectral de la luz reflejada solar, a través de quince bandas. Su periodo de operación consideró desde 29 de abril del 2002 al 08 de abril de 2012.

Entre las principales contribuciones de los datos MERIS están el estudio de las superficies oceánicas mediante la detección de fitoplancton (algas); la detección de material orgánico disuelto y la detección de materia en suspensión (sedimentos suspendidos o transportados por ríos). También la detección de surgencias especiales de plancton, por ejemplo, mareas rojas a través de su característica de absorción cerca de 520 nm.

e) Mir/HICO (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/hico/>)

Periodo de operación desde el 25 de septiembre de 2009 al 13 de septiembre de 2014.

El Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) fue el primer espectrómetro de imagen de tipo hiperespectral, diseñado para el monitoreo de las zonas costeras de océanos. HICOS fue diseñado para obtener una escena de 50 x 200 km en cada órbita, estando acoplado a la Estación Espacial Internacional Mir), cubriendo espectralmente desde los 380 a 960 nm, con anchos de banda de 5.7 nm. Los productos obtenidos incluían la transparencia de agua y batimetría.

f) SAC-D Aquarius ([www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/sac-d](http://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/sac-d); <https://aquarius.nasa.gov/>)

El objetivo de esta misión, en relación a cuerpos de agua, estuvo orientado a la recopilación de información climática a partir de las mediciones de salinidad superficial. El instrumento utilizado correspondió a un radiómetro (1.413 Ghz) y un escaterómetro (1.26 Ghz) integrados, con un ancho de barrido de 380 km.

La misión SAC-D / Aquarius fue un programa de cooperación entre la Comisión Nacional Espacial Argentina (CONAE), el Centro Goddard y el Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA. El satélite SAC-D fue puesto en órbita por la NASA el 10 de Junio de 2011 y concluyó su servicio operativo el 07 de Junio de 2015.



## Misiones Activas

### a) Aqua y Terra/MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento montado en los satélites Terra y Aqua. Actualmente ambos satélites están en operación y se cuenta con información desde el 24 de febrero de 2000 para el satélite Terra, mientras que para el Aqua es desde el 04 de julio de 2002.

Los sensores MODIS/Terra y MODIS/Aqua adquieren datos en 36 bandas espectrales, con una resolución radiométrica de 12 bits y resolución espacial de 250, 500 y 1000 m (Anexo 1), con un ancho de track de 2.330 km. Los datos obtenidos se utilizan principalmente para investigar la dinámica global de procesos ocurridos en la superficie terrestre (suelos y agua), como también en la baja atmósfera. Los satélites Terra y Aqua tienen revisita de una vez por día, con paso aproximadamente a las 15:00:00 y 18:00:00 GMT, respectivamente.

El detalle de la resolución espectral y espacial del sensor MODIS se presenta en el Anexo 1.

Los productos obtenidos en relación a los cuerpos de agua son:

- La concentración de clorofila chl\_a (mg/m<sup>3</sup>).
- El coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar KD-490 nm (1/m).
- La concentración de Particulate Organic Carbon (POC) (mg/m<sup>3</sup>).
- La concentración de Particulate Inorganic Carbon (PIC) (mol/m<sup>3</sup>).

### b) COMS/GOCI y GEOKompsat-2B/GOCI II (<http://kosc.kiost.ac.kr/index.nm>; <https://ioccg.org/sensor/goci-2/>)

El Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) es uno de los instrumentos a bordo del satélite geoestacionario Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS), que proporciona exclusivamente imágenes del mar de Corea. Tiene una resolución espectral de 8 bandas (6 visible y 2 NIR), todas con resolución espacial de 500 metros. El principal producto corresponde a la concentración de clorofila, el coeficiente de atenuación difusa (K-490), la concentración de material orgánico disuelto o sustancia amarilla y la concentración de partículas en suspensión superficial del mar. El satélite COMS fue puesto en órbita el 01 de junio de 2010, y todavía está en funcionamiento.

Una versión más nueva es el GOCI II, montado en el satélite GEOKompsat-2B, puesto en órbita el 18 de febrero de 2020 y cuenta con 13 bandas espectrales, entre los 380 y 900 nm, y una resolución espacial de 250 metros.

c) Sentinel-3/OLCI (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>)

El sensor Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) está montado en los satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B, puestos en órbita el 15 de mayo de 2016 y 25 de abril de 2018, respectivamente. Ambos están operativos actualmente y permiten el monitoreo de los océanos, con énfasis en zonas costeras y mares o lagos interiores.

Las imágenes del sensor OLCI pueden ser obtenidas en su resolución espacial original de aproximadamente 300 metros (Full Resolution - FR), como también con una resolución espacial reducida (Reduced Resolution - RR) de aproximadamente 1.2 km. Este sensor cuenta con 21 bandas cubriendo espectralmente desde los 400 a 1020 nm, con un ancho de track de 1.270 km y un periodo de revisita de una vez por día, con paso aproximadamente a las 14:00:00 GMT.

El detalle de la resolución espectral y espacial del OLCI se presenta en el Anexo 1.

Los productos obtenidos en relación a los cuerpos de agua son:

- La concentración de clorofila chl<sub>a</sub> (mg/m<sup>3</sup>).
- La concentración total de material sólido suspendido (Total Suspended Matter-TSM) (g/m<sup>3</sup>).
- El coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar KD-490 nm (1/m).
- El coeficiente de absorción del Coloured Dissolved Organic Matter (CDOM) a 443 nm (1/m).

d) JPSS-1 y Suomi-NPP/VIIRS ([https://www.nasa.gov/mission\\_pages/NPP/mission\\_overview/](https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/mission_overview/); <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/s-npp-nasa-viirs-overview/>; <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/suomi-npp>)

El Visible and Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) es un instrumento montado en la serie de satélites Joint Polar Satellite System (JPSS-1), como también en el Suomi National Polar-orbiting Partnership (S-NPP), puestos en funciones el 29 de noviembre de 2017 y 02 de enero de 2012, con paso aproximadamente a las 18:40:00 y 18:20:00 GMT, respectivamente y con resolución radiométrica de 12 bits. En particular el satélite JPSS-1 es también conocido como NOAA-20.

El sensor VIIRS es el sucesor de los sensores MODIS, contando con 22 bandas espectrales que cubren el rango desde 412 a 12.000 nm, con un periodo de revisita de una imagen por día.

El detalle de la resolución espectral y espacial del VIIRS se presenta en el Anexo 1.

Los productos obtenidos en relación a los cuerpos de agua son:

- La concentración de clorofila chl<sub>a</sub> (mg/m<sup>3</sup>)
- El coeficiente de atenuación difusa para la irradiancia solar KD-490 nm (1/m)
- La concentración de Particulate Organic Carbon (POC) (mg/m<sup>3</sup>)
- La concentración de Particulate Inorganic Carbon (PIC) (mol/m<sup>3</sup>)

## Características de sensores Satelitales

En la Tabla 1, se presenta un resumen de las diferentes resoluciones de sensores satelitales comerciales y no comerciales, considerando además otras características de interés. Adicionalmente en la Tabla 2, se presenta el uso potencial de dichos sensores satelitales para la obtención de diferentes parámetros asociados al monitoreo de la calidad de agua.

Tabla 1. Características de imágenes satelitales.

	Satélite	Sensor	Nº de bandas / Resolución Espacial [m] <sup>(1)</sup>					Resolución Radiométrica [bit]	Resolución Temporal [días]	Ancho del tile [km]	Costo Aprox. por km <sup>2</sup> <sup>(2)</sup>
			VIS	NIR	SWIR	TIR	PAN				
COMERCIALES	Fasat-C	NAOMI	3/5.8	1/5.8	X	X	1/1.45	12	5	10.15	US\$0.59
	GeoEye1		3/1.65	1/1.65	X	X	1/.41	11	3	15.2	US\$14.0
	GeoEye2 (WorldView-4)		3/1.36	X	X	X	1/.34	11	3	14.5	US\$22.5
	Ikonos		3/3.28	1/3.28	X	X	1/.82	11	3/5	11.3	US\$10.0
	RapidEye		4/5.0	1/5.0	X	X	X	12	1	77.0	US\$1.28
	Kompsat-3		3/2.8	1/2.8	X	X	1/.7	14	1.4/4.1	16.8	US\$8.0
	WorldView-2		6/1.85	2/1.85	X	X	1/.46	11	1.1/3.7	16.4	US\$19.5
	WorldView-3		6/1.24	2/1.24	8/3.7	X	1/.31	11/14	4.5	13.1	US\$21.0
	SPOT-6		3/8.8	1/8.8	X	X	1/2.2	12	1/5	60	US\$5.15
	SPOT-7		3/8.8	1/8.8	X	X	1/2.2	12	1/5	60	US\$5.15
	Formosat-2		3/8.0	1/8.0	X	X	1/2.0	12	1	24	US\$4.23
	Pleiades-1		3/2.8	1/2.8	X	X	1/.7	12	1	20	US\$12.5
	QuickBird		3/2.44	1/2.44	X	X	1/0.61	11	2.4/5.9	16.8/18.0	US\$17.5
NO COMERCIALES	Aqua	MODIS	1/250 2/500 7/1000	1/250 2/500 6/1000	1/500 10/1000	6/1000	X	12	1	2330	FA
	Terra	MODIS	1/250 2/500 7/1000	1/250 2/500 6/1000	1/500 10/1000	6/1000	X	12	1	2330	FA
	LandSat-8	OLI	4/30	1/30	2/30	2/100	1/15	12	16	200x200	FA

Proyecto FIC: Aplicación e integración de tecnologías de información y nuevas herramientas biotecnológicas, para el monitoreo colaborativo de lagos, que asegure la conservación del recurso hídrico, resguarde la salud humana, animal y contribuya al desarrollo integral de la Región.

LandSat-7	ETM+	3/30	1/30	2/30	1/60	1/15	8	16		FA
COMS	GOCI	6/500	2/500	X	X	X	12	1 hora	2500	FA
Geo KompSat-2B	GOCI-II	1/250 8/250	3/250	X	X	X	14	1 hora	2500	FA
Sentinel-2A/B	MSI	1/60 3/10	1/10 4/20 1/60	1/60 2/20	X	X	12	5	100x100	FA
Sentinel-3A/B	OLCI	9/300	12/300	X	X	X		1	1270	FA
Suomi-NPP	VIIRS	6/750	3/750	8/750	4/750	X	12	1	3000	FA
JPSS-1	VIIRS	6/750	3/750	8/750	4/750	X	12	1	3000	FA

(1) En el nadir

(2) Apollo Mapping S.A. (Valor imagen archivo)

VIS: Visible.

NIR: Infrarrojo Cercano.

SWIR: Infrarrojo Medio o de Onda Corta.

TIR: Infrarrojo Termal.

PAN: Pancromático.

FA: Free Access.

Tabla 2. Capacidad de satelitales para la obtención de diferentes productos asociados al monitoreo de la calidad de agua.

	Satélite	Sensor	Chla	KD-490	PIC	POC	CDOM-443	TSM
COMERCIALES	Fasat-C	NAOMI	S	S	N	S	N	S
	GeoEye1		S	S	N	N	N	S
	GeoEye2		S	S	N	N	N	S
	Ikonos		S	S	N	N	N	S
	RapidEye		S	S	N	N	N	S
	Kompsat 3		S	S	N	N	N	S
	WorldView2		S	S	N	N	N	S
	WorldView3		S	S	N	N	N	S
	SPOT6		S	S	N	N	N	S
	SPOT7		S	S	N	N	N	S
	Formosat2		S	S	N	N	N	S
	Pleiades 1B		S	S	N	N	N	S
	QuickBird		S	S	N	N	N	S
NO COMERCIALES	Aqua	MODIS	S	S	S	S	S	S
	Terra	MODIS	S	S	S	S	S	S
	Sentinel-2A/B	MSI	S	S	-	-	S	S
	Sentinel-3A/B	OLCI	S	S	-	-	S	S
	LandSat-8	OLI	S	S	-	-	S	S
	LandSat-7	ETM+	S	S	N	N	N	S
	Suomi NPP	VIIRS	S	S	-	-	S	S
	JPSS-1	VIIRS	S	S	-	-	S	S

## Conclusiones

Sin duda el desarrollo en materia de sensores satelitales y sus aplicaciones principalmente en el monitoreo de cuerpo de agua, ha aumentado en la última década permitiendo un alto monitoreo espacio/temporal acorde las necesidades de los tomadores de decisión en función de la calidad de agua.

Los sensores diseñados específicamente para el monitoreo de la calidad de las aguas, tales como MODIS a bordo del Satélite AQUA y TERRA, cuentan sin lugar a dudas con las más adecuadas resoluciones temporales y espectrales, pero su resolución espacial para la mayoría de las bandas del visible e infrarrojo cercano (12 de 17, Anexo 1) tienen una resolución espacial de 1000 metros (Tabla 1), lo que puede no ser la mejor para aplicaciones especialmente en el monitoreo de cuerpos de agua tales como son los lagos del sur de Chile. Una solución a lo anterior puede ser el usar imágenes del satélite Sentinel-3, con el sensor OLCI, con resolución espacial de aproximadamente 300 metros. Pero si se desea estudiar la calidad del agua de pequeños lagos, o lagunas, entonces se tiene la posibilidad de hacer uso de sensores que cuentan con resoluciones espaciales en el rango de las decenas de metros, aun cuando no necesariamente estén diseñados para obtener parámetros relacionados con la calidad de las aguas. Este es el caso de sensores tales como OLI de Landsat-8 (30 m) y MSI de Sentinel-2 (10 y 20 m) respectivamente, que tienen la capacidad de poder ser usados para la estimación de variables tales como la transparencia, partículas suspendidas en el agua y clorofila (Tabla 2).

En cuanto a los sensores satelitales comerciales presentes en este informe, el que tengan una alta resolución espacial es una ventaja para ciertas aplicaciones orientadas al monitoreo de la superficie terrestre. Pero en el caso de aplicaciones en cuerpos de agua terminan no siendo idóneos, ya que su capacidad de capturar un muy alto detalle espacial (en algunos casos menor a un par de metros), termina agregando “ruido” en los productos obtenidos, como es la capacidad de detectar los valles y crestas de las olas (problema de refracción en superficies cóncavas y/o convexas), lo que introduce errores en los cálculos de las variables en interés.

Visto que no existe un sensor “ideal”, la elección respecto a las imágenes a ser utilizadas para un estudio de la calidad de aguas tendrá que estar basada primordialmente en las necesidades tanto, temporales, espaciales, espectrales y de sensibilidad radiométrica requeridas para cada estudio o monitoreo que se desee realizar.

## Referencias

- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). Determination of water quality Vichuquén Lake, using satellite images Landsat 8, sensor OLI, year 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, 0(52), 67-78. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>
- Campbell, J.B., (1987). *Introduction to remote sensing*. New York and London: The Guilford Press, 551p.
- Chuvieco E. (2002). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel. Barcelona, España. 586 pp.
- Huovinen, P., Ramírez, J., Caputo, L., & Gómez, I. (2019). Mapping of spatial and temporal variation of water characteristics through satellite remote sensing in Lake Panguipulli, Chile. *Science of The Total Environment*. doi: <https://10.1016/j.scitotenv.2019.04.367>
- Jackson, R., Idso, S., Reginato, R. & Pinter, J. P., (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, Volumen 17, p. 1133.
- Platnick S., King M. D., Ackerman S. A., Menzel W.P., Baum B. A., Riédi J. C. & Frey R. A. (2003). The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41:2. 459–473.
- Schmugge T. J., Kustas W. P., Ritchie J. C., Jackson T. J. & Rango A. (2002). Remote Sensing in Hidrology. *Advances in Water Resources* 25: 1367–1385.
- Sobrino, J. y otros, (2000). *Teledetección*. Segunda ed. Valencia: Universidad de Valencia.

## Anexo 1

### Sensor MODIS

Bandas	Longitud de onda central (nm)	Resolución Espacial (m)
1	620 - 670	250
2	841 - 876	250
3	459 - 479	500
4	545 - 565	500
5	1230 - 1250	500
6	1628 - 1652	500
7	2105 - 2155	500
8	405 - 420	1000
9	438 - 448	1000
10	483 - 493	1000
11	526 - 536	1000
12	546 - 556	1000
13	662 - 672	1000
14	673 - 683	1000
15	743 - 753	1000
16	862 - 877	1000
17	890 - 920	1000
18	931 - 941	1000
19	915 - 965	1000
20	3660 - 3840	1000
21	3929 - 3989	1000
22	3929 - 3989	1000
23	4020 - 4080	1000
24	4433 - 4498	1000
25	4482 - 4549	1000
26	1360 - 1390	1000
27	6535 - 6895	1000
28	7175 - 7475	1000
29	8400 - 8700	1000
30	9580 - 9880	1000
31	10780 - 11280	1000
32	11770 - 12270	1000
33	13185 - 13485	1000
34	13485 - 13785	1000
35	13785 - 14085	1000
36	14085 - 14385	1000



## Sensor OLCI

Bandas	Longitud de onda central (nm)	Resolución Espacial (m)
Oa1	392.5-415.0	300
Oa2	407.5-417.5	300
Oa3	437.5-447.5	300
Oa4	485-495	300
Oa5	505-515	300
Oa6	555-565	300
Oa7	615-625	300
Oa8	660-670	300
Oa9	670-677.5	300
Oa10	677.5-685	300
Oa11	703.75-713.75	300
Oa12	750-757.5	300
Oa13	760-762.5	300
Oa14	762.5-766.25	300
Oa15	766.25-768.75	300
Oa16	771.25-786.25	300
Oa17	855-875	300
Oa18	880-890	300
Oa19	895-905	300
Oa20	930-950	300
Oa21	1000-1040	300

## Sensor VIIRS

Bandas	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial (m)
M1	402-422	750
M2	436-454	750
M3	478-488	750
M4	545-565	750
M5	662-682	750
M6	739-754	750
M7	846-885	750
M8	1230-1250	750
M9	1371-1386	750
M10	1580-1640	750
M11	2230-2280	750
M12	3610-3790	750
M13	3970-4130	750
M14	8400-8700	750
M15	10260-11260	750
M16	11540-12490	750
I1	600-680	375
I2	850-880	375
I3	1580-1640	375
I4	3550-3930	375
I5	10500-12400	375