



INFORME TÉCNICO Nro 1:

Identificación de la relación entre imágenes satelitales Sentinel 3 y muestreos de agua en el Lago Llanquihue

Proyecto: 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.
Código BIP 4018207-0

Elaborado por: Gino Sandoval V.
Febrero 2022.

Tabla de contenidos	Páginas
Introducción	2
Elementos a evaluar	3
Imágenes Sentinel 3	3
Comparación datos SNIFA	4
Análisis piloto dentro del área de vigilancia Puerto Varas	6
Unidades de medida	8
Análisis realizados	11
Comparación datos SNIFA - Sentinel 3	11
Comparación datos preliminares área piloto - Sentinel 3	13
Resultados	14
Comparación información Clorofila SNIFA / Sentinel 3	14
Comparación información Turbiedad SNIFA / Sentinel 3	19
Comparación información Transparencia SNIFA / Sentinel 3	20
Comparación datos preliminares área piloto - Sentinel 3	23
Conclusiones preliminares	25
Referencias	26

Introducción

El presente informe es una parte del objetivo número cuatro del proyecto FIC Más azul: “Evaluar la utilización de la teledetección como técnica para el monitoreo de calidad de agua de cuerpos lacustres”, el cual da cuenta de la comparación preliminar entre los datos satelitales WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 (clorofila - turbiedad - transparencia) con datos obtenidos de terreno obtenidos y registrados en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) para el período 2017 - 2019. Adicionalmente se trabajó con los datos de la primera campaña de terreno con datos superficiales en un análisis piloto dentro del área de vigilancia de Puerto Varas.

Se dan a conocer las principales características de los elementos a evaluar (clorofila - turbiedad - transparencia) como la obtención de ellas, fechas, unidades de medidas, etc. Posteriormente se desglosan los diferentes análisis realizados para poder identificar las potenciales relaciones que tiene la información disponible.

Se logró identificar algunas relaciones puntuales que muestran indicadores estadísticos significativos sobre todo para el caso de la clorofila, aunque existe una dispersión no menor entre los datos tomados en terreno con los datos Sentinel 3. También se pudo constatar una baja cantidad de datos disponibles que afectan sin duda cualquier potencial análisis como fue el caso de la turbiedad.

Dentro del análisis entre los datos del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) y los datos satelitales WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 aparece la transparencia con las mayores diferencias y problemas para poder establecer relaciones.

Finalmente se analizan de forma preliminar los datos a nivel superficial obtenidos en la primera campaña dentro del área de vigilancia de Puerto Varas en donde no se obtienen hasta el momento resultados significativos y menos concluyentes con la información de los productos de clorofila, turbiedad y transparencia de WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3.

Elementos a evaluar

Se compararon los productos WFR (Water Full Resolution) del satélite Sentinel 3 de Clorofila, Concentración de materia en suspensión y Coeficiente de atenuación difusa con los datos tomados en campañas de terreno disponibles en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) perteneciente a la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), los cuales corresponden al seguimiento del cumplimiento de la norma secundaria en el Lago Llanquihue.

Adicionalmente se evaluaron los mismos productos del Sentinel 3 con datos tomados de forma superficial en el lago Llanquihue, específicamente en un área piloto al interior del área de vigilancia de Puerto Varas.

Imágenes Sentinel 3

La evaluación de imágenes satelitales Sentinel 3 para el monitoreo de calidad del agua en el Lago Llanquihue se efectuó con imágenes de libre acceso del sitio web [Eumetsat CODA](#), en la cual se encuentra alojados los productos WFR (Water Full Resolution) y dentro de los cuales se trabajó solo con tres productos:

- Concentración de pigmento de algas / Algal Pigment Concentration (CHL_NN): Producto que muestra la concentración de clorofila en el agua medida en mg/m^3 .
- Concentración total de materia en suspensión / Total Suspended Matter Concentration (TSM_NN): Producto que muestra la carga sedimentaria o turbidez en el agua medida en g/m^3 .
- Coeficiente de atenuación difusa / Diffuse Attenuation Coefficient (KD490): Producto que muestra la penetración de la luz en los cuerpos de agua (transparencia) y esta medida en m^{-1} lo que representa la velocidad a la que la luz a los 490 nm se atenúa con la profundidad del cuerpo de agua.

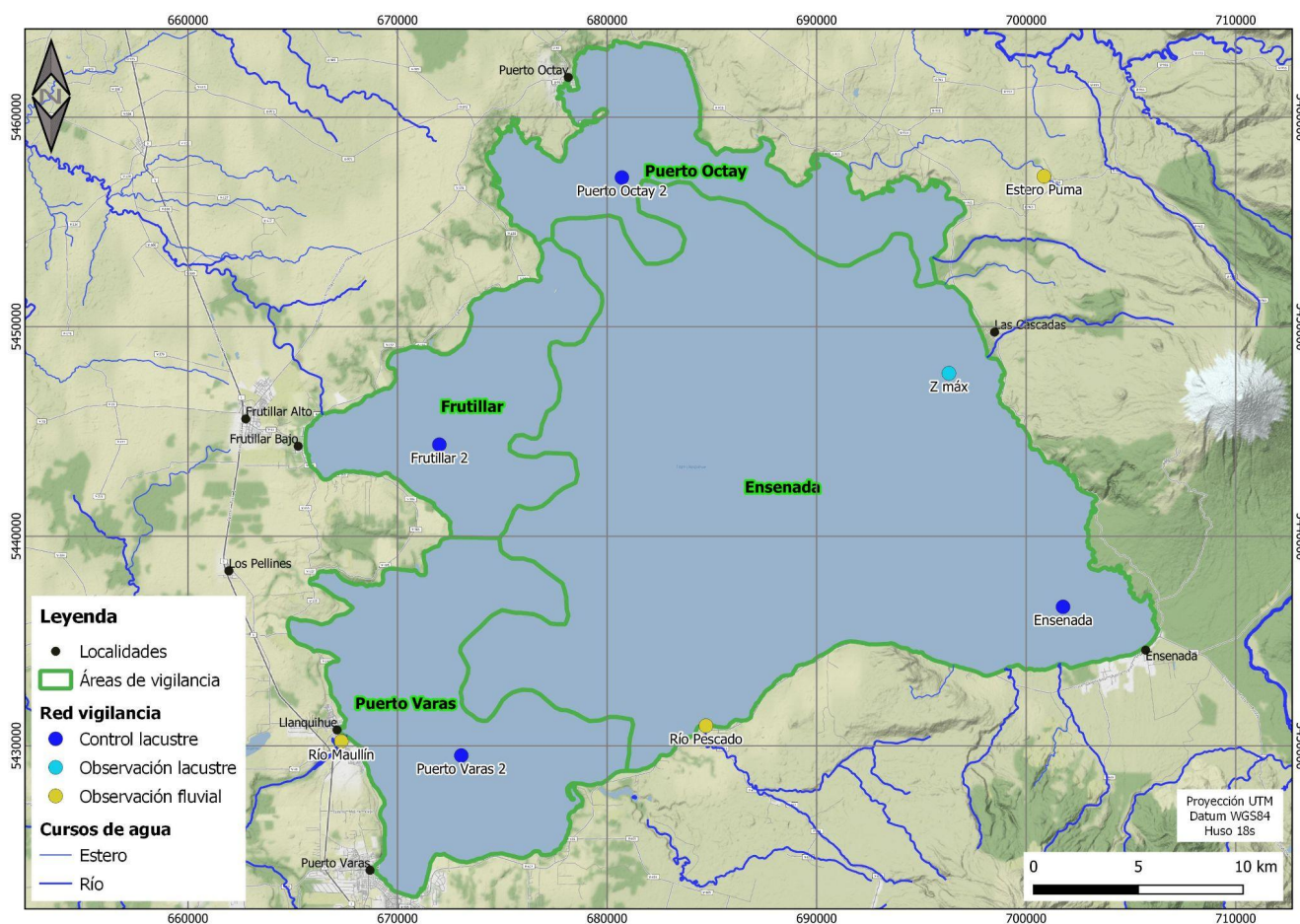
Estos tres productos tienen una resolución espacial de 300 metros aproximadamente y resolución temporal de 1,5 días, las fechas específicas se irán señalando en función de cada análisis realizado.

Comparación datos SNIFA

Dentro del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) se encuentran disponibles los informes y datos de muestreo de agua para el cumplimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas del Lago Llanquihue, esta información contiene diversas características que se van a ir detallando a continuación.

Dentro de la red de monitoreo¹ del Lago Llanquihue existen cinco puntos de monitoreo al interior del lago Llanquihue (4 de control lacustre; 1 de observación lacustre) que están dentro de cuatro zonas de vigilancia (figura 1), adicionalmente existen tres puntos de monitoreo en cursos fluviales (siendo dos afluentes y un efluente).

Figura 1. Ubicación red de vigilancia Lago Llanquihue



Fuente: Elaborado a partir de DCPRH Minuta N° 32 (2019).

¹ La red de monitoreo utilizada en el presente informe está basada en los informes de los períodos 2017-2018 y 2018-2019, para el año 2021 se dictó vía Resolución 296 exenta la ampliación de los puntos de muestreo llegando a ser 17 puntos en el cuerpo de agua y 6 en los cursos fluviales pertenecientes al sistema, pero no existen a la fecha informes disponibles con información de muestreos.

Por normativa las campañas de muestreo deben ser dos veces al año, una en verano y otra en invierno, esto debido a que el lago en la primera se encuentra en periodo de estratificación y durante la segunda campaña en periodo de mezcla. Para efectos del presente trabajo se utilizarán los datos obtenidos a partir de año 2017 (inicio información Sentinel 3) al 2019 (último año disponible en SNIFA), las fechas que se pueden observar en la Tabla 1 muestran que las campañas de muestreo no coinciden totalmente con la fecha de la imagen Sentinel 3, esto es debido a la gran cantidad de días nublados existentes en la zona del Lago Llanquihue, por lo cual se debió ocupar la imagen disponible más cercana, lo que claramente implica una potencial diferencia entre lo registrado en muestreo in situ versus lo que muestra la imagen satelital.

Tabla 1. Fechas de muestreos disponibles e imágenes Sentinel 3 más cercanas.

ESTACION	Puerto Octay			Puerto Varas		
CAMPAÑA	SNIFA	Sentinel 3	Diferencia días - = días antes + = días después	SNIFA	Sentinel 3	Diferencia días - = días antes + = días después
Verano 2017	14-03-2017	31-01-2017	-42	14-03-2017	31-01-2017	-42
Invierno 2017	02-08-2017	09-09-2017	38	01-08-2017	09-09-2017	39
Verano 2018	13-03-2018	24-02-2018	-17	14-03-2018	24-02-2018	-18
Invierno 2018	21-08-2018	02-07-2018	-50	21-08-2018	02-07-2018	-50
Verano 2019	13-03-2019	10-03-2019	-3	13-03-2019	10-03-2019	-3
Invierno 2019	06-08-2019	03-09-2019	28	07-08-2019	03-09-2019	27
ESTACION	Frutillar			Ensenada		
CAMPAÑA	SNIFA	Sentinel 3	Diferencia días - = días antes + = días después	SNIFA	Sentinel 3	Diferencia días - = días antes + = días después
Verano 2017	15-03-2017	31-01-2017	-43	13-03-2017	31-01-2017	-41
Invierno 2017	01-08-2017	09-09-2017	39	01-08-2017	09-09-2017	39
Verano 2018	14-03-2018	24-02-2018	-18	14-03-2018	24-02-2018	-18
Invierno 2018	21-08-2018	02-07-2018	-50	21-08-2018	02-07-2018	-50
Verano 2019	13-03-2019	10-03-2019	-3	12-03-2019	10-03-2019	-2
Invierno 2019	07-08-2019	03-09-2019	27	07-08-2019	03-09-2019	27

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

De la misma forma la norma secundaria fija para las campañas de verano e invierno once parámetros y las profundidades en las cuales se deben realizar los análisis (Tabla 2). De los once parámetros se utilizarán solo tres para la comparación con los productos del Sentinel 3 (Turbidez - Clorofila a - Transparencia), asimismo en los casos de turbiedad y clorofila se utilizarán los datos a diferentes profundidades como también el promedio de ellos.

Tabla 2. Parámetros registrados y profundidades analizadas

Parámetro	Unidad	Profundidades en verano (metros)	Profundidades en invierno (metros)
Conductividad	μS/cm	0 15 30 50 80 100	0 30 100
pH	Unidad		
Oxígeno Disuelto	mg/L		
Oxígeno Disuelto %	%		
Turbiedad	NTU		
Sílice	mg/L		
DQO	mg/L		
Clorofila a	μg/L		
Nitrógeno Total	mg/L		
Fósforo Total	mg/L		
Transparencia	m	-	-

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021)

Análisis piloto dentro del área de vigilancia Puerto Varas

Con el fin de evaluar y comparar el comportamiento y variabilidad de los datos Sentinel 3 a una escala de mayor detalle, es que se realizó un análisis piloto al interior del área de vigilancia del Puerto Varas (figura 2), específicamente la zona comprendida entre el inicio del río Maullín (localidad de Llanquihue) y Laguna La Poza (aproximadamente 15 Km al este de Puerto Varas).

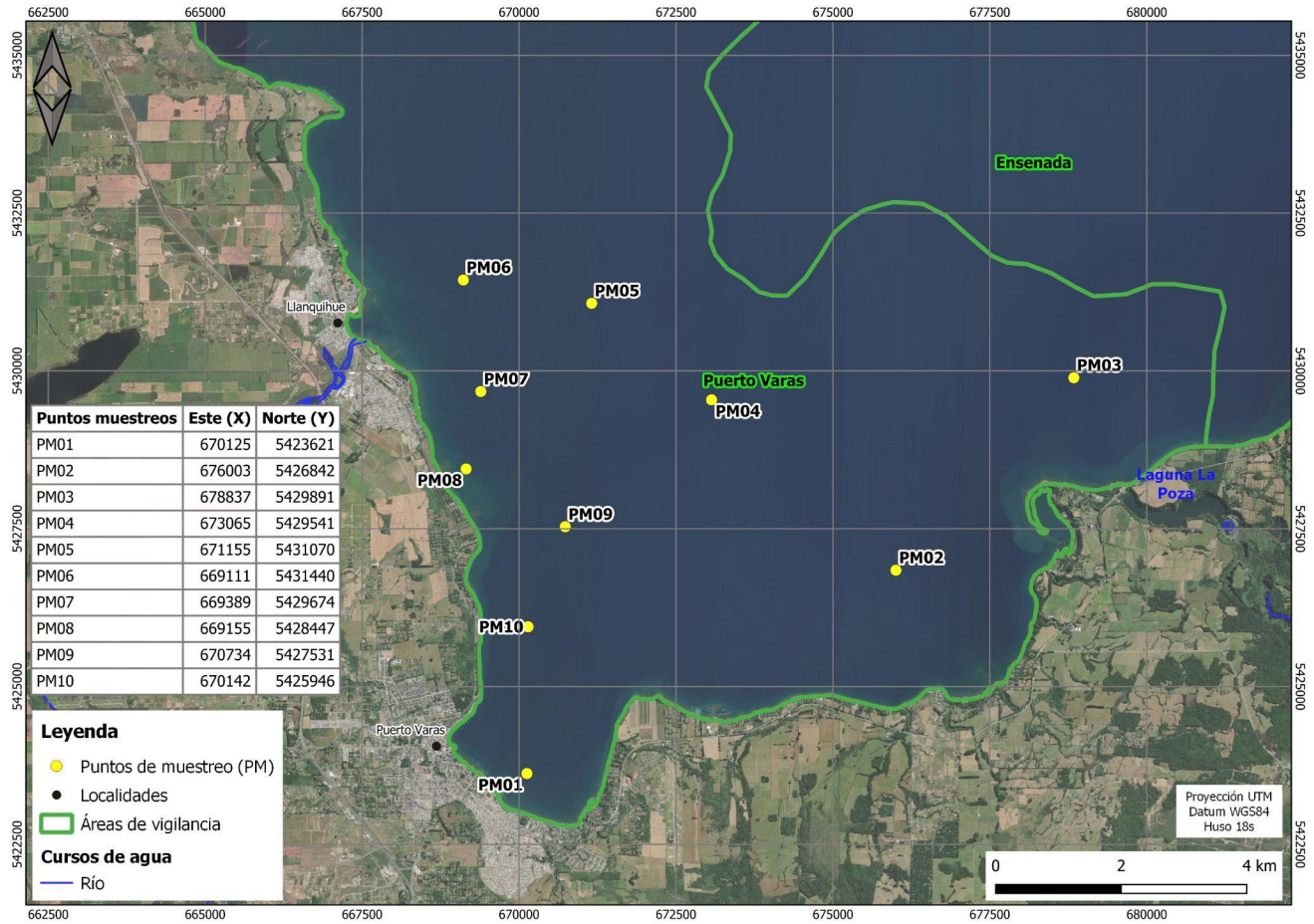
Este muestreo de 10 puntos fue de carácter aleatorio solo a nivel superficial, de esta forma se busca identificar si la información Sentinel 3 que posee una resolución espacial de alrededor de 300 metros es capaz representar las variaciones a un nivel de mayor detalle y en un espacio más reducido.

Hasta el momento la 1ra fecha de muestreo fue el 11 de enero del 2022, el cual da cuenta del inicio del período estival de vacaciones, en donde empieza a existir una mayor carga de población flotante en el Lago Llanquihue.

La 2da fecha propuesta corresponde al 03 de marzo del 2022, en este caso daría cuenta del fin del período estival de vacaciones. Por lo cual este muestreo busca además de identificar variaciones a un nivel de detalle mayor y en un período de tiempo más acotado.

Donde además ambas fechas al ser en verano están dentro del período de menor nubosidad, tema bastante importante para poder comparar los datos obtenidos en el muestreo con los del satélite Sentinel 3.

Figura 2. Puntos de muestreos aplicados en terreno 11-01-2022



Fuente: Elaboración propia

Unidades de medida

Antes de continuar es necesario tener en cuenta que los diferentes datos trabajados en el presente informe se encuentran en algunos casos en diferentes unidades de medida, por lo cual se debe considerar lo siguiente en cada caso:

Clorofila:

En el caso de la clorofila existen dos unidades de medidas utilizadas, para los datos obtenidos desde SNIFA (2020; 2021) se utiliza como unidad Microgramos por Litro ($\mu\text{g/L}$), en cambio en las imágenes satelitales Sentinel 3 y los datos de laboratorio para muestreo piloto la unidad de medida corresponde Miligramo por Metro Cúbico (mg/m^3).

Donde las equivalencias corresponden a :

$$1 \text{ mg} = 1.000 \mu\text{g};$$

$$1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ L}$$

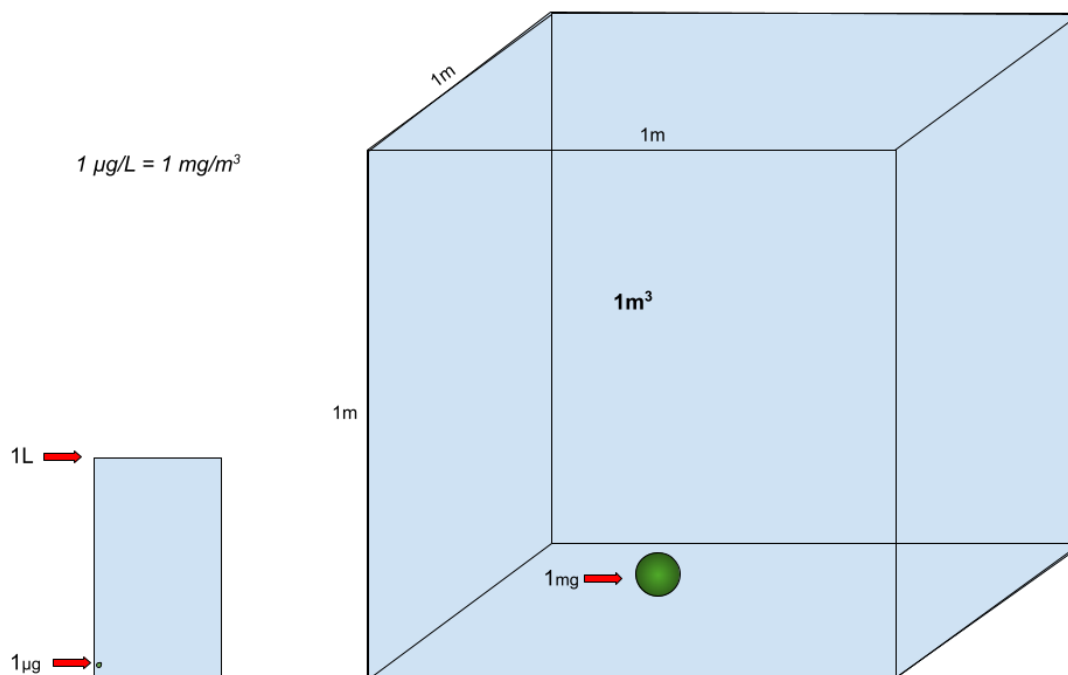
Por lo tanto:

$$1 \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \Rightarrow \frac{0.001 \text{ mg}}{0.001 \text{ m}^3} \Rightarrow 1 \text{ mg/m}^3$$

$$1 \mu\text{g/L} = 1 \text{ mg/m}^3$$

Lo que significa que las unidades trabajadas son proporcionales entre sí a diferentes magnitudes de volúmenes (Figura 3).

Figura 3. Ejemplo de proporciones unidades Clorofila

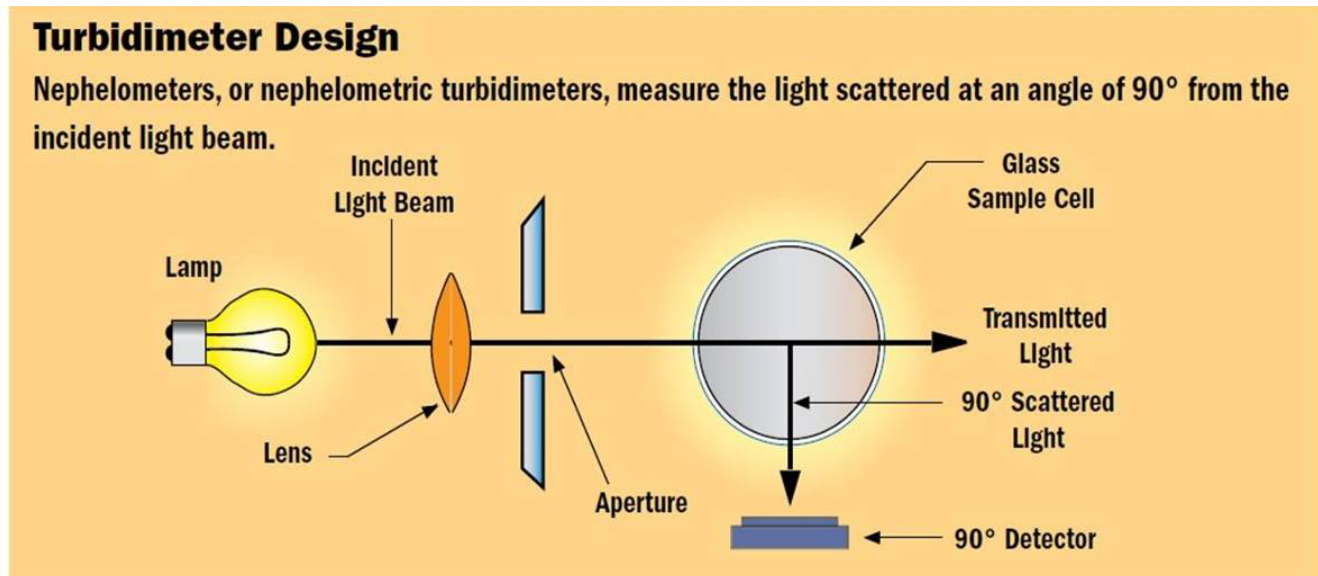


Fuente: Elaboración propia

Turbidez:

Las unidades de medida de la turbidez o turbiedad, son muy disímiles ya que corresponden a diferentes formas de medición, por un lado tanto los datos extraídos desde el sitio web de SNIFA que están en NTU (Nephelometric Turbidity Unit), como los datos de laboratorio para el área de muestreo piloto medidas en FNU (Formazin Nephelometric Unit) miden este parámetro a través de la luz difusa de la muestra en un ángulo de 90 grados con respecto a la luz incidente (Figura 4).

Figura 4. Diseño óptico de un turbidímetro o nefelómetro



Fuente: MetAS & Metrólogos Asociados (2010)

Básicamente este método de análisis mide la dispersión de la luz debido a las partículas en suspensión, donde a mayor carga de sedimentos mayor será la dispersión, en el caso del NTU y FNU las diferencia radican en la solución química que utilizan pero son totalmente equivalentes:

$$NTU = FNU$$

Mientras que los productos WFR de Sentinel 3, expresa la carga sedimentaria del cuerpo de agua en g/m^3 , claramente no son comparables en su unidad bruta pero si en su comportamiento ya que ambas muestran que a medida que sus respectivos valores son más altos mayor es la carga sedimentaria.

Transparencia:

En cuanto al parámetro de transparencia, el método utilizado tanto en los informes disponibles en SNIFA como los realizados en el área piloto de muestreo fueron realizados a través de un disco secchi el cual permite identificar y medir la penetración luminosa en el cuerpo de agua, a través de

una cuerda graduada atado a un disco de fibra de vidrio (blanco con negro) con peso, por lo cual la unidad está medida en metros o centímetros dependiendo la graduación de la cuerda (figura 5).

Por otro lado en el coeficiente de atenuación difusa en los 490 nm del producto WFR de Sentinel 3, representa la velocidad a la que la luz a los 490 nm se atenúa con la profundidad del cuerpo de agua (EUMETSAT, 2021), está expresada en $\frac{1}{\text{metro}}$, pero para efectos del presente informe se convertirá a metros para una más fácil interpretación mediante la elevación a -1 del producto KD490. De esta forma se puede comparar directamente los valores tanto de muestreo en terreno como los descargados del Sentinel 3, finalmente se multiplicaron por -1 para que fuera metros de transparencia hacia la profundidad del lago.

Figura 5. Ejemplo medición con disco secchi



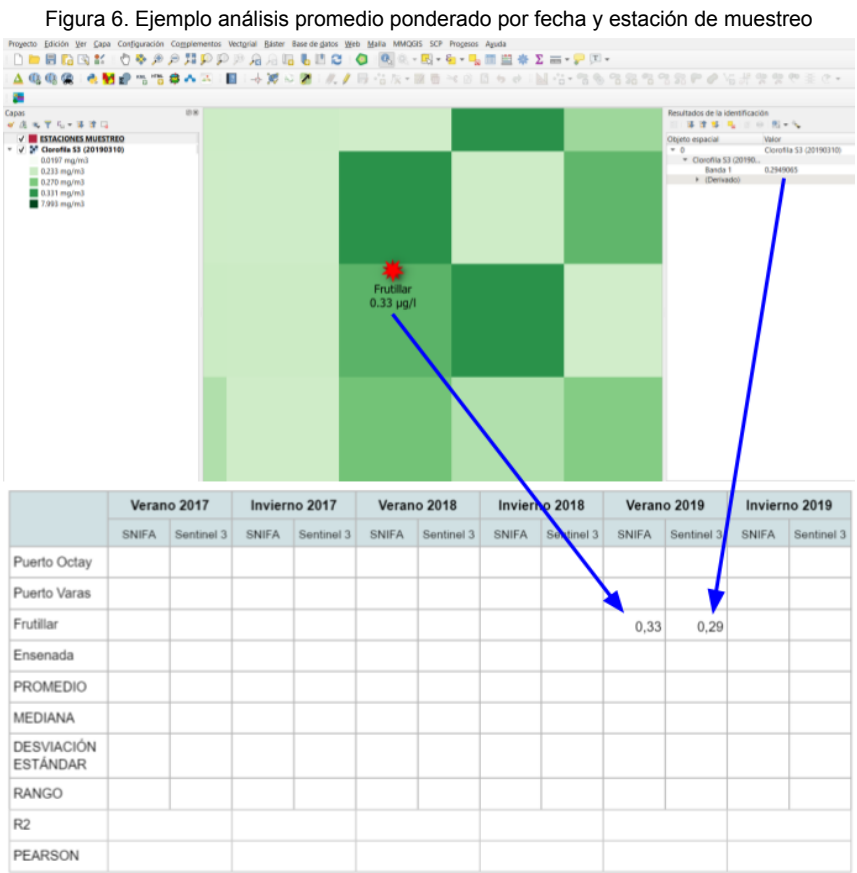
Fuente: Elaboración propia

Análisis realizados

Para el análisis propuesto se utilizará estadística descriptiva a diferentes niveles dependiendo la disponibilidad de datos, es por ello que a continuación se desglosa según fuente de información:

Comparación datos SNIFA - Sentinel 3

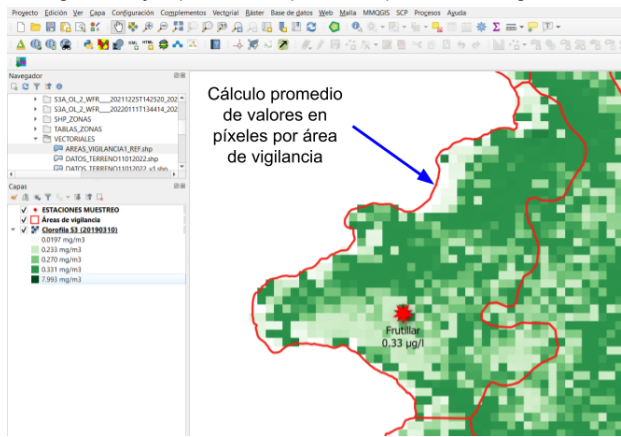
- Primero se utilizó el promedio ponderado de la estación de muestreo comparándolo con píxel Sentinel 3 inmediatamente superpuesto ordenados por fechas y luego por estación (figura 6), se trabajó con estadística descriptiva con el fin de identificar el comportamiento estadístico de los datos, además de identificar la diferencia entre los valores brutos de cada elemento cuando fuera pertinente, se usaron medidas de tendencia central (promedio - mediana), medidas de dispersión (desviación estándar – rango), además de utilizar como indicadores el coeficiente R2 y la correlación de Pearson, el primero para determinar cuánto se ajustan los datos, mientras el segundo sirvió para identificar si la potencial relación era directa o indirecta, adicionalmente se crearon gráficos de dispersión para así mostrar cómo se relacionan los datos.



Fuente: Elaboración propia

- Posteriormente se utilizó la información desglosada según profundidad (verano: superficial - 15 - 30 – 50; invierno: Invierno: superficial – 30) con el píxel Sentinel 3 inmediatamente superpuesto ordenados por fecha y luego por estación, se trabajó con el coeficiente R2 y correlación de pearson como indicadores para identificar comportamientos estadísticos similares. La razón de analizar los valores obtenidos a las diferentes profundidades registradas para los parámetros trabajados (no se aplica a transparencia), es para poder identificar si existe una discrepancia entre el valor promedio en la columna de agua y el satélite, que este último podría no considerar la columna en su totalidad (hasta los 100 metros de profundidad).
- Cómo tercer análisis (no aplica al parámetro de transparencia) se trabajó con el promedio ponderado de la estación de muestreo con el promedio de valores de Sentinel 3 por área de vigilancia (figura 7), ya que los primeros por normativa secundaria las tomas de muestras son proporcionales a la superficie del lago y sus áreas de vigilancia, se ordenados por fecha y luego por estación. Se utilizó el coeficiente R2 y la correlación de Pearson.

Figura 7. Ejemplo análisis promedio por área de vigilancia



Fuente: Elaboración propia

- Finalmente se utilizó el promedio ponderado de la estación de muestreo con píxel Sentinel 3 inmediatamente superpuesto, ordenados por estación de muestreo y luego por fecha, con este análisis se pretende analizar el comportamiento en las diferentes campañas en cada estación de muestreo, Se utilizó el coeficiente R2 y la correlación de Pearson, además se crearon gráficos de líneas para identificar comportamiento estadístico más allá del valor bruto (figura 8).

Figura 8. Ejemplo análisis promedio por punto de muestreo

ESTACIÓN	Muestreo 1			Muestreo 2		
	Variable A	Variable B	Comparación gráfica	Variable A	Variable B	Comparación gráfica
Temporada / Dato						
Verano 2017	1,15	0,14		1,17	0,11	
Invierno 2017	1,92	0,98		1,58	0,87	
Verano 2018	0,57	0,25		0,42	0,56	
Invierno 2018	2,07	1,34		2,66	0,86	
Verano 2019	0,29	0,26		0,34	0,33	
Invierno 2019	0,55	1,04		0,84	0,34	
R2 / Pearson	0,41	0,64		0,40	0,63	

Fuente: Elaboración propia

Comparación datos preliminares área piloto - Sentinel 3

Para la comparación de los primeros de datos del terreno del 11 de enero 2022 con la información satelital WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 y teniendo en cuenta que queda pendiente la segunda campaña de terreno durante marzo, es solo se hará para este informe una aproximación entre los datos mediante el uso de estadística descriptiva,.

Se utilizó valor del punto de muestreo superficial comparándolo con píxel Sentinel 3 inmediatamente superpuesto, se identificó la diferencia entre los valores brutos de cada elemento cuando fuera pertinente, se usaron medidas de tendencia central (promedio - mediana), medidas de dispersión (desviación estándar – rango), además de utilizar como indicadores el coeficiente R2 y la correlación de Pearson, el primero para determinar cuánto se ajustan los datos, mientras el segundo sirvió para identificar si la potencial relación era directa o indirecta, adicionalmente se crearon gráficos de dispersión para así mostrar cómo se relacionan los datos.

Resultados

Comparación información Clorofila SNIFA / Sentinel 3

Este resultado corresponde al análisis del dato de la estación de muestreo (SNIFA 2020; 2021) con el valor del píxel del producto Sentinel 3 superpuesto al punto de la estación, en donde se puede apreciar en tabla 3 que:

- Los datos difieren en su valor, donde la diferencia muestra en general que los datos Sentinel 3 de clorofila son menores que los obtenidos en los muestreos en terreno.
- Si para lo anterior está la excepción durante el verano 2019 donde además de que los valores son similares, el R2 y Pearson arrojan resultados significativos y de mayor ajuste.
- En el caso de invierno 2017 el comportamiento estadístico es similar (R2 y Pearson son significativos) pero el dato tiene diferencias en la cantidad de clorofila, siendo menor el valor en el caso del Sentinel 3.
- Para verano 2017 el comportamiento es inversamente proporcional por lo cual no tiene un ajuste adecuado.
- En los casos de verano 2018, invierno 2018 - 2019 existe un comportamiento estadístico disímil y que no se ajustan los valores SNIFA con Sentinel 3.

Tabla 3. Comparación clorofila entre datos SNIFA y Sentinel 3 a nivel de punto

	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay	1,15	0,14	1,92	0,98	0,57	0,25	2,07	1,34	0,29	0,26	0,55	1,04
Puerto Varas	1,17	0,11	1,58	0,87	0,42	0,56	2,66	0,86	0,34	0,33	0,84	0,34
Frutillar	1,27	0,07	1,74	0,94	0,63	0,41	2,86	1,14	0,33	0,29	0,70	0,32
Ensenada	0,80	0,27	1,32	0,35		0,29	2,21	0,09	0,26	0,22	0,45	0,33
PROMEDIO	1,10	0,15	1,64	0,79	0,54	0,38	2,45	0,86	0,31	0,27	0,64	0,51
MEDIANA	1,16	0,13	1,66	0,90	0,57	0,35	2,44	1,00	0,31	0,28	0,63	0,33
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,21	0,09	0,25	0,29	0,11	0,14	0,37	0,55	0,04	0,05	0,17	0,36
RANGO	0,47	0,20	0,60	0,63	0,21	0,31	0,79	1,25	0,08	0,11	0,39	0,72
R2	0,98		0,83		0,48		0,04		0,97		0,10	
PEARSON	-0,99		0,91		-0,69		0,19		0,98		-0,32	

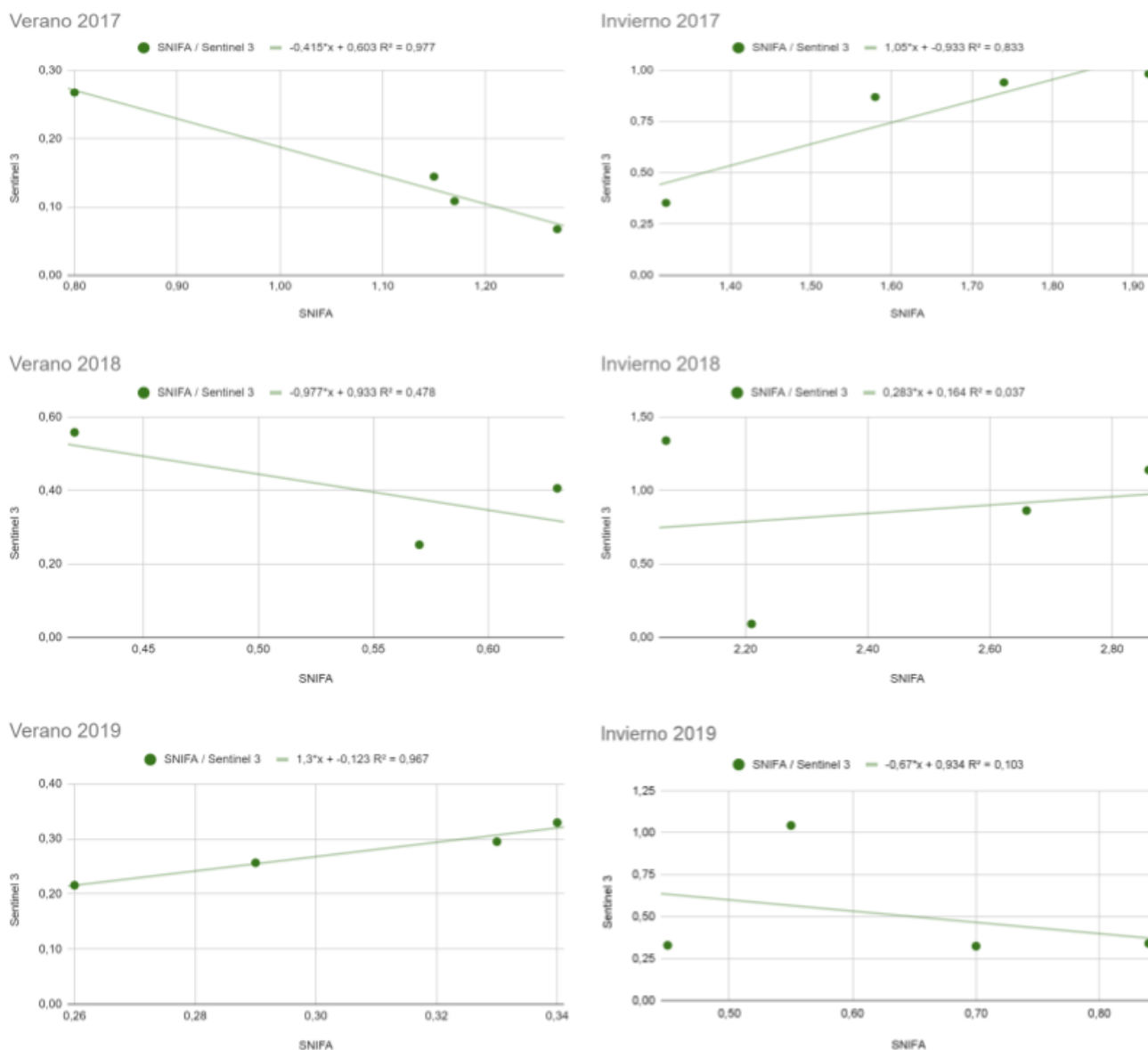
Sin medición

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Lo anterior se ve reflejado en la figura 9, donde los gráficos de dispersión muestran los mayores ajustes estadísticos en el invierno 2017 y verano 2019, cabe recordar que verano 2019 es donde los productos Sentinel 3 tienen una diferencia de 2 a 3 días con la toma de muestras en el lago Llanquihue, mientras que invierno 2017 la diferencia es de 38 a 39 días pero como se observa se ajustan bastante bien.

Verano 2018 donde la diferencia de días también es reducida no hay un comportamiento estadístico similar, aunque se debe señalar que no hay medición para la estación de muestreo de ensenada.

Figura 9. Comparación clorofila entre datos SNIFA y Sentinel 3 a nivel de punto



Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

El siguiente resultado corresponde al análisis de los datos tomados en terreno (SNIFA 2020; 2021) desglosados según profundidad comparado en el valor del píxel del producto de clorofila Sentinel 3, se puede apreciar en tabla 4 que solo existe un comportamiento similar en los datos de invierno 2017 a nivel superficial y promedio entre niveles superficial - 15 m - 30 m. En los casos destacados en rojo, existe una relación indirecta que no guarda relación con el comportamiento esperado.

Tabla 4. Comparación datos clorofila SNIFA según profundidad y Sentinel 3

Clorofila (Invierno/Verano: superficial)												
Campaña	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
Muestreo / Dato	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay	1,30	0,14	1,40	0,98	0,90	0,25	0,90	1,34	0,20	0,26	0,60	1,04
Puerto Varas	1,40	0,11	1,40	0,87	0,80	0,56	2,60	0,86	0,10	0,33	1,10	0,34
Frutillar	1,30	0,07	1,40	0,94	0,40	0,41	1,00	1,14	0,40	0,29	0,60	0,32
Ensenada	1,40	0,27	1,00	0,35	0,60	0,29	2,10	0,09	0,40	0,22	0,30	0,33
Pearson / R2	0,55	0,30	0,99	0,97	-0,08	0,01	-0,64	0,42	-0,59	0,35	-0,09	0,01
Clorofila (Verano: superficial - 15)												
Campaña	Verano 2017		Verano 2018		Verano 2019							
Muestreo / Dato	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3						
Puerto Octay	1,35	0,14	0,85	0,98	0,25	0,25						
Puerto Varas	1,80	0,11	0,60	0,87	0,20	0,56						
Frutillar	1,40	0,07	0,50	0,94	0,35	0,41						
Ensenada	1,50	0,27	0,60	0,35	0,35	0,29						
Pearson / R2	-0,06	0,004	0,26	0,065	-0,48	0,228						
Clorofila (Verano: superficial - 15 - 30 / Invierno: superficial - 30)												
Campaña	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
Muestreo / Dato	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay	1,30	0,14	1,70	0,98	0,70	0,25	1,60	1,34	0,30	0,26	0,55	1,04
Puerto Varas	1,50	0,11	1,55	0,87	0,47	0,56	2,60	0,86	0,23	0,33	0,90	0,34
Frutillar	1,37	0,07	1,60	0,94	0,53	0,41	2,10	1,14	0,33	0,29	0,80	0,32
Ensenada	1,30	0,27	1,25	0,35	0,60	0,29	2,00	0,09	0,33	0,22	0,30	0,33
Pearson / R2	-0,54	0,29	0,98	0,97	-0,93	0,87	-0,24	0,06	-0,72	0,52	-0,21	0,04
Clorofila (Verano: superficial - 15 - 30 - 50)												
Campaña	Verano 2017		Verano 2018		Verano 2019							
Muestreo / Dato	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3						
Puerto Octay	1,30	0,14	0,60	0,98	0,30	0,25						
Puerto Varas	1,38	0,11	0,48	0,87	0,25	0,56						
Frutillar	1,38	0,07	0,63	0,94	0,33	0,41						
Ensenada	1,15	0,27	0,60	0,35	0,35	0,29						
Pearson / R2	-0,98	0,96	-0,11	0,01	-0,72	0,52						

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

En cuanto al resultado del valor de clorofila en el punto de muestreo (SNIFA 2020; 2021) con respecto al promedio de los valores que contienen los píxeles en las cuatro áreas de vigilancia, se observa en tabla 5 que se mantiene un alto ajuste de datos y alta correlación estadística para verano 2019, además de tener valores similares. Por otro lado tenemos que tanto verano 2017, invierno 2018 e invierno 2019 poseen un Pearson relativamente significativo pero su ajuste mediante el coeficiente R2 tiende a no ser muy alto.

Por último en invierno 2017 y verano 2018 no poseen un ajuste para nada cercano, de hecho todo lo contrario en verano 2018 donde incluso hay falta de información.

En general se observa mediante este análisis un mejoramiento de la relación entre los datos tomados en terreno y los obtenidos mediante Sentinel 3, donde cabe recordar que verano 2019 es aquel que tiene la menor diferencia en la toma de datos y la imagen disponible sin nubosidad en el lago.

Verano 2017, invierno 2018 e invierno 2019 corresponde a los períodos donde las fechas son las más alejadas, pero al utilizar el promedio por área de vigilancia el comportamiento de los datos tiende a ser más parecido, esto se destaca sobre todo para el periodo verano 2017 el cual anteriormente había mostrado una relación indirecta.

Se recuerda que se mantiene la diferencia entre los valores brutos de los datos tomados en terreno versus los obtenidos con Sentinel 3, siendo menores en términos generales los obtenidos mediante satélite.

Tabla 5. Comparación datos clorofila SNIFA según área de vigilancia y Sentinel 3

Campaña	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
Muestreo / Dato	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay	1,15	0,55	1,92	0,84	0,57	0,43	2,07	1,10	0,29	0,31	0,55	0,50
Puerto Varas	1,17	0,79	1,58	1,42	0,42	0,48	2,66	1,12	0,34	0,32	0,84	0,50
Frutillar	1,27	0,79	1,74	1,21	0,63	0,40	2,86	1,31	0,33	0,34	0,70	0,50
Ensenada	0,80	0,47	1,32	0,51		0,39	2,21	0,94	0,26	0,28	0,45	0,45
Pearson	0,81		0,35		-1,00		0,77		0,90		0,77	
R2	0,66		0,12		1,00		0,59		0,80		0,59	

Sin medición

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Al analizar el comportamiento temporal de la información de clorofila en cada estación de muestreo con el dato del píxel en que se encuentra inmediatamente sobrepuesto, se obtuvo un bajo ajuste de los datos, se puede observar en tabla 6 que los indicadores utilizados (coeficiente R2 / correlación de Pearson) muestran una baja significancia estadística.

Lo que sí es relevante de señalar es que mediante la comparación gráfica se evidencia algún grado de similitud en el comportamiento general, en donde a excepción de Ensenada las demás estaciones de muestreo, muestran que cuando los valores disminuyen o aumentan esto se produce en ambos datos, claramente no en la misma proporción o magnitud lo que hace que los indicadores no se ajusten, pero es interesante ya que incluso con un desfase de fecha importante en algunos casos, existe la posibilidad de realizar un seguimiento e identificar mediante los productos o índices de clorofila del WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 el comportamiento temporal del Lago Llanquihue, no es sus valores brutos pero si en el comportamiento.

Tabla 6. Comparación datos clorofila SNIFA/Sentinel 3 según punto de muestreo y año

ESTACIÓN	Puerto Octay			Puerto Varas		
Temporada / Dato	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3
Verano 2017	1,15	0,14		1,17	0,11	
Invierno 2017	1,92	0,98		1,58	0,87	
Verano 2018	0,57	0,25		0,42	0,56	
Invierno 2018	2,07	1,34		2,66	0,86	
Verano 2019	0,29	0,26		0,34	0,33	
Invierno 2019	0,55	1,04		0,84	0,34	
R2 / Pearson	0,41	0,64		0,40	0,63	
ESTACIÓN	Frutillar			Ensenada		
Temporada / Dato	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3
Verano 2017	1,27	0,07		0,80	0,27	
Invierno 2017	1,74	0,94		1,32	0,35	
Verano 2018	0,63	0,41			0,29	
Invierno 2018	2,86	1,14		2,21	0,09	
Verano 2019	0,33	0,29		0,26	0,22	
Invierno 2019	0,70	0,32		0,45	0,33	
R2 / Pearson	0,66	0,81		0,30	-0,55	
	Sin medición					

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Comparación información Turbiedad SNIFA / Sentinel 3

En el caso de la turbiedad no se obtuvieron muchos resultados ya que como se pueden observar en la tabla 7 existen tres campañas sin mediciones (verano 2017; invierno 2017; invierno 2018) y una estación de muestreo en una campaña (verano 2018) sin medición, por lo cual solo existe un 45% de datos potenciales disponibles para el análisis.

Dentro de los pocos datos se puede observar en tabla 7 que existe una muy baja relación y ajuste estadístico entre los datos tomados en terreno y los obtenidos mediante Sentinel 3, donde incluso para el verano 2018 e invierno 2019 existe una relación inversa.

Tabla 7. Comparación turbiedad entre datos SNIFA y Sentinel 3 a nivel de punto

	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay		0,08		0,16	0,60	0,28		0,43	0,12	0,18	0,70	0,30
Puerto Varas		0,12		0,18	0,21	0,43		0,53	0,10	0,25	0,69	0,12
Frutillar		0,09		0,18	0,21	0,35		0,31	0,52	0,23	0,96	0,15
Ensenada		0,18		0,07		0,30		321,79	0,11	0,19	0,76	0,17
PROMEDIO	---	0,12	---	0,15	0,34	0,34	---	80,76	0,21	0,21	0,78	0,18
MEDIANA	---	0,10	---	0,17	0,21	0,33	---	0,48	0,12	0,21	0,73	0,16
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	---	0,05	---	0,05	0,23	0,07	---	160,68	0,21	0,03	0,13	0,08
RANGO	---	0,11	---	0,11	0,39	0,15	---	321,48	0,42	0,07	0,27	0,17
R2		---		---		0,75		---		0,08		0,11
PEARSON		---		---		-0,86		---		0,28		-0,34
	Sin medición											

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Comparación información Transparencia SNIFA / Sentinel 3

En el primer resultado de comparación de los datos de transparencia podemos observar en tabla 8 que en general existe un bajo ajuste entre los datos tomados en terreno y la información satelital Sentinel 3, solo en verano 2017 existe un mayor ajuste y una correlación más significativa.

Este bajo ajuste y relación puede estar relacionado con varios elementos, entre ellos es la diferencia de fechas entre la toma del dato en terreno y la imagen Sentinel 3 donde invierno 2018 además de tener un bajo ajuste la diferencia del valor de metros de transparencia hacia la profundidad del lago son muy altas. La diferencia de fechas como en este caso es un tema sensible ya que las condiciones de transparencia no solo dependen del lago si no también de la variabilidad meteorológica y estacional de la luminosidad ambiental.

Además recordar que los valores de Sentinel 3 están relacionados con un área/píxel de 300 x 300 metros a diferencia del muestreo que se realiza en un punto, lo cual claramente puede estar afectando la relación potencial que se busca establecer en el presente informe, lo cual podría explicar la baja relación para verano 2019 que tiene solo 3 días de diferencia entre los datos y a pesar que las diferencias entre los valores sean los menores dentro de los períodos analizados.

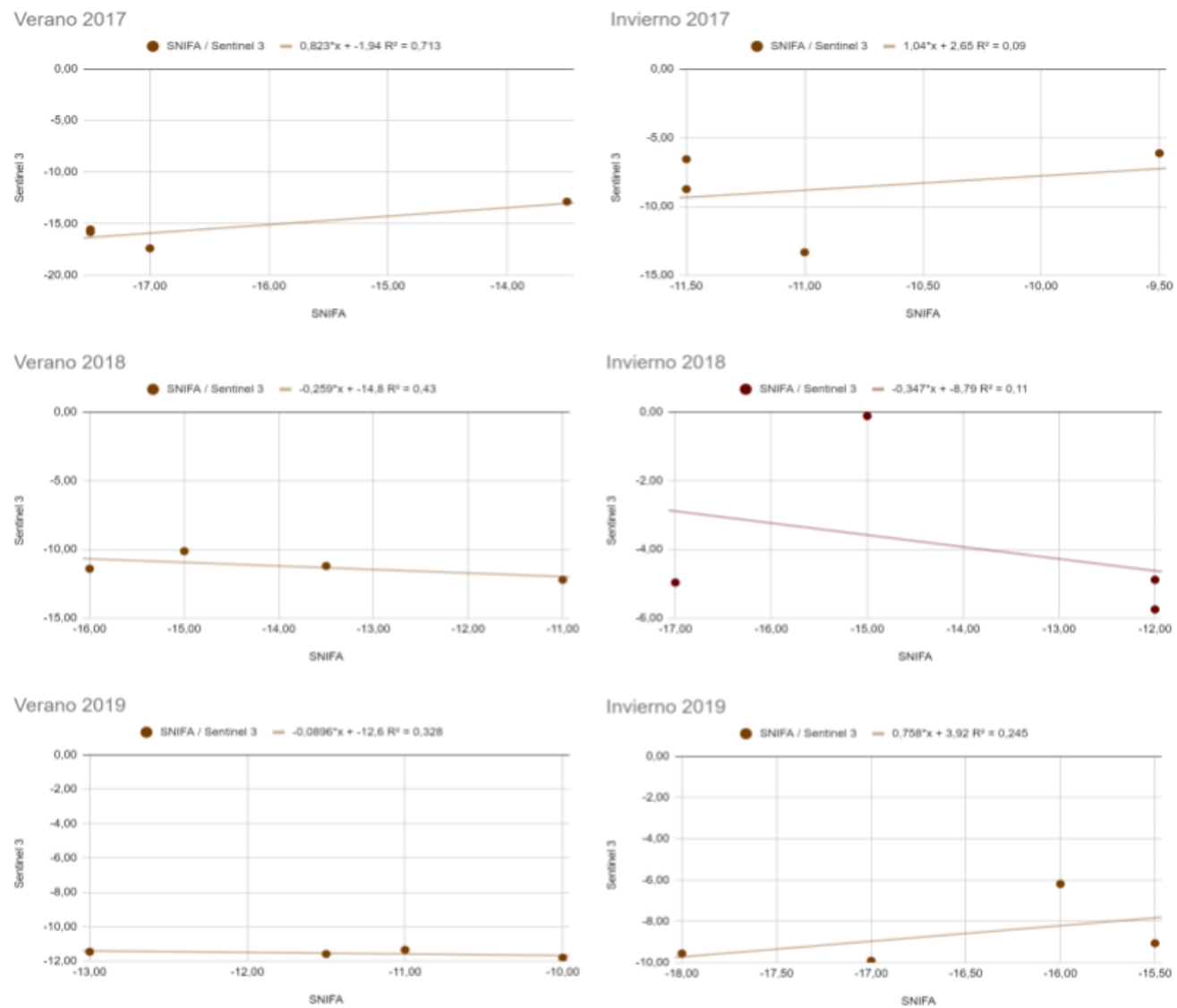
Tabla 8.Comparación transparencia entre datos SNIFA y Sentinel 3 a nivel de punto

	Verano 2017		Invierno 2017		Verano 2018		Invierno 2018		Verano 2019		Invierno 2019	
	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3
Puerto Octay	-17,50	-15,82	-11,50	-6,57	-11,00	-12,22	-12,00	-4,88	-11,00	-11,35	-16,00	-6,19
Puerto Varas	-17,50	-15,57	-9,50	-6,13	-15,00	-10,13	-12,00	-5,75	-11,50	-11,59	-18,00	-9,56
Frutillar	-17,00	-17,40	-11,50	-8,74	-13,50	-11,21	-17,00	-4,96	-13,00	-11,46	-17,00	-9,91
Ensenada	-13,50	-12,86	-11,00	-13,33	-16,00	-11,41	-15,00	-0,12	-10,00	-11,80	-15,50	-9,06
PROMEDIO	-16,38	-15,41	-10,88	-8,69	-13,88	-11,24	-14,00	-3,93	-11,38	-11,55	-16,63	-8,68
MEDIANA	-17,25	-15,70	-11,25	-7,65	-14,25	-11,31	-13,50	-4,92	-11,25	-11,52	-16,50	-9,31
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,93	1,88	0,95	3,30	2,17	0,86	2,45	2,57	1,25	0,20	1,11	1,70
RANGO	4,00	4,53	2,00	7,20	5,00	2,08	5,00	5,62	3,00	0,45	2,50	3,72
R2	0,71		0,09		0,43		0,11		0,33		0,25	
PEARSON	0,84		0,30		-0,66		-0,33		-0,57		0,50	

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Los bajos ajustes y relaciones señaladas anteriormente se evidencian gráficamente en la figura 10, donde verano 2018 y 2019 presentan una tendencia inversa que no corresponde a lo esperado, además la comparación de los datos de invierno muestra una dispersión sin ningún patrón en común.

Figura 10. Comparación transparencia entre datos SNIFA y Sentinel 3 a nivel de punto



Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Al analizar el comportamiento temporal de la información de transparencia en cada estación de muestreo con el dato del píxel en que se encuentra inmediatamente sobrepuesto, se obtuvo un bajo ajuste de los datos, se puede observar en tabla 9 que los indicadores utilizados (coeficiente R2 / correlación de Pearson) muestran una baja significancia estadística y la comparación gráfica no presenta un patrón común en ninguna estación.

Tabla 9. Datos Transparencia SNIFA/Sentinel 3 según punto de muestreo y año

ESTACIÓN	Puerto Octay			Puerto Varas		
Temporada / Dato	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3
Verano 2017	-17,50	-15,82		-17,50	-15,57	
Invierno 2017	-11,50	-6,57		-9,50	-6,13	
Verano 2018	-11,00	-12,22		-15,00	-10,13	
Invierno 2018	-12,00	-4,88		-12,00	-5,75	
Verano 2019	-11,00	-11,35		-11,50	-11,59	
Invierno 2019	-16,00	-6,19		-18,00	-9,56	
R2 / Pearson	0,09	0,30		0,40	0,63	
ESTACIÓN	Frutillar			Ensenada		
Temporada / Dato	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3	SNIFA	Sentinel 3	Comparación gráfica: SNIFA Sentinel 3
Verano 2017	-17,00	-17,40		-13,50	-12,86	
Invierno 2017	-11,50	-8,74		-11,00	-13,33	
Verano 2018	-13,50	-11,21		-16,00	-11,41	
Invierno 2018	-17,00	-4,96		-15,00	-0,12	
Verano 2019	-13,00	-11,46		-10,00	-11,80	
Invierno 2019	-17,00	-9,91		-15,50	-9,06	
R2 / Pearson	0,01	0,10		0,20	-0,45	

Fuente: Elaborado a partir de SNIFA (2020; 2021); EUMETSAT (2022)

Comparación datos preliminares área piloto - Sentinel 3

Los primeros datos de la campaña de terreno del día 11 de enero 2022 arrojaron algunos elementos iniciales que se analizarán preliminarmente a continuación, señalar que el día de campaña de terreno fue un día despejado sin nubosidad (0 octas) y que por lo tanto los datos obtenidos desde WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 corresponde al mismo día de terreno.

Transparencia: En este caso los datos iniciales que se observan en tabla 10 muestran que existe en general una subestimación de los valores de transparencia por parte de KD490 Sentinel 3 frente a los datos tomados en terreno, que cabe señalar los datos en terreno fueron tomados mediante disco secchi con un largo máximo de 16 metros, de todas formas solo dos puntos de muestreos muestran valores sobre 16 metros en el KD490 (PM04; PM05), mientras los demás ocho puntos de muestreo existe una diferencia considerable entre lo registrado en terreno y lo obtenido con Sentinel 3, es por aquello que tanto el coeficiente R^2 como la correlación de Pearson muestra que no existe hasta el momento un ajuste entre los datos.

Turbiedad: En el caso de los datos de turbiedad mostrados en la tabla 10, se logra identificar que hasta el momento los datos superficiales no tienen un ajuste con los datos Sentinel 3 e incluso mediante la correlación de Pearson muestra una baja relación inversa, sí cabe recordar aquí que los valores no pueden ser evaluados y comparados directamente ya que son obtenidos mediante dos métodos diferentes y expresados en unidades no equivalentes, pero de todas formas no se aprecia un patrón en común.

Clorofila: Para los datos superficiales preliminares de clorofila la tabla 10 muestra que los datos obtenidos en terreno tienen una baja concentración de clorofila donde nueve de los diez puntos de muestreos están por debajo de los $0,08 \text{ mg/m}^3$, lo cual está en por debajo del límite de detección en el laboratorio, de todas formas los valores satelitales obtenidos desde WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 muestran una sobre estimación donde solo el punto PM01 se encuentra con valor menor al límite de detección siendo $0,041 \text{ mg/m}^3$, ahora tampoco el valor más alto encontrado en terreno $0,42 \text{ mg/m}^3$ del PM02 es el más alto dentro de los datos satelitales.

Sin duda no se genera un ajuste entre los datos, sobretodo al estar por debajo del límite de detección, se espera poder observar las variaciones no solo de la clorofila si no también de los otros dos parámetros en la segunda campaña de terreno de marzo y así poder establecer si existe o no un ajuste a una escala de mayor detalle entre los datos tomados en terreno y los datos de WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 que vayan más allá del dato crudo.

Tabla 10. Datos Laboratorio / Sentinel 3 según punto de muestreo

Punto de muestreo	Transparencia (metros)		Turbiedad		Clorofila (mg/m3)	
	Disco secchi	KD490	FNU	TSM (g/m3)	Laboratorio*	CHL-a
PM01	>16,000	3,339	0,240	0,021	<0,080	0,041
PM02	>16,000	10,183	0,280	0,099	0,420	0,261
PM03	>16,000	8,650	0,160	0,108	<0,080	0,281
PM04	>16,000	25,674	0,180	0,084	<0,080	0,243
PM05	>16,000	18,028	0,110	0,103	<0,080	0,196
PM06	>16,000	9,385	0,110	0,068	<0,080	0,261
PM07	>16,000	8,888	0,110	0,063	<0,080	0,109
PM08	7,300	3,931	0,110	0,281	<0,080	0,281
PM09	>16,000	9,644	0,120	0,081	<0,080	0,271
PM10	>16,000	6,959	0,040	0,095	<0,080	0,163
Promedio	15,13	10,47	0,15	0,10	0,11	0,21
Mediana	16,00	9,14	0,12	0,09	0,08	0,25
Desviación Estándar	2,75	6,68	0,07	0,07	0,11	0,08
Máximo	16,00	25,67	0,28	0,28	0,42	0,28
Mínimo	7,30	3,34	0,04	0,02	0,08	0,04
R2		0,12		0,06		0,05
Pearson		0,34		-0,25		0,22

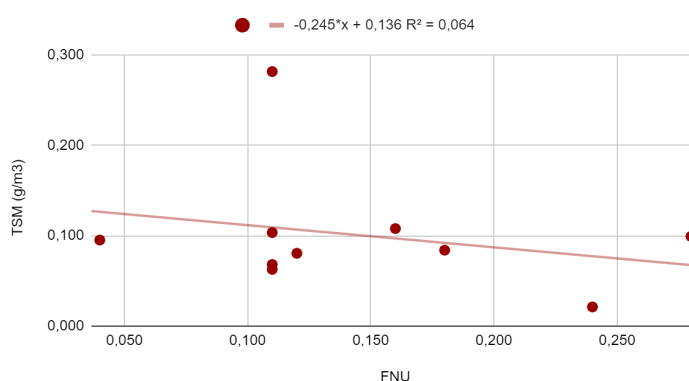
* Datos clorofila <0,008 debajo del límite de detección

Fuente: Elaborado a partir de datos tomados en terreno (2022); EUMETSAT (2022)

Debido a que los datos de clorofila obtenidos en terreno están por debajo del límite de detección y los valores de transparencia superan el largo del instrumental utilizado, solo se grafica de forma inicial el comportamiento de la turbiedad, en donde la figura 11 se puede observar que existe un bajo ajuste entre los datos sobretodo en el PM08 que se escapa de la línea de tendencia, que es inversa.

Figura 11. Turbiedad Laboratorio (FNU) / Sentinel 3 (g/m3)

Turbiedad 11-01-2022



Fuente: Elaborado a partir de datos tomados en terreno (2022); EUMETSAT (2022)

Conclusiones preliminares

En general las diferentes comparaciones entre la información oficial obtenida desde el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA) y los datos satelitales WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3, muestran un bajo ajuste estadístico a excepción de ciertos análisis puntuales sobretodo de clorofila, en donde influyen distintos elementos, el primero sin duda es la diferencia de fechas entre la información obtenida en terreno con la fecha de una imagen satelital sin nubosidad, lo cual se mantiene como un tema relevante sobretodo por la alta nubosidad existente en la zona del lago Llanquihue, se evidencia en el caso del verano 2019 un mayor ajuste en donde la diferencia de días no es mayor a tres.

Adicionalmente existen otros elementos que pueden estar influyendo en esta escasa relación, como la baja cantidad de datos existentes pero sin duda útiles, lo cual deja sin poder hacer mayores análisis en el caso de la turbiedad, también está la diferencia de escalas ya que la unidad mínima de los productos Sentinel 3 corresponden a un área/píxel de 300 x 300 metros a diferencia del muestreo que se realiza en un punto dentro del lago.

En el caso del análisis preliminar del área piloto al interior del área de vigilancia de Puerto Varas comparado con los datos satelitales WFR/OLCI Level 2 de SENTINEL 3 se evidencia un bajo ajuste y relación que tiene diversas causas, instrumentales en el caso de la transparencia y clorofila pero de todas formas se espera dilucidar y mejorar las causas como las potenciales relaciones ya con los datos a obtener en la segunda campaña de terreno.

Referencias

Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH). 2019. Minuta N°32 Antecedentes para elaborar informe de calidad. Normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas del Lago Llanquihue.

European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). 2022. Sentinel 3 Copernicus Data Access. Recuperado enero 2022 de <https://coda.eumetsat.int/#/home>

European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). 2021, Sentinel-3 Product Notice - OLCI Level 2 Ocean Colour, Collection 3. Recuperado enero 2022 de <https://www.eumetsat.int/ocean-colour-services?lang=EN>

European Space Agency (ESA). 2000-2021. Sentinel Online. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>

MetAS & Metrólogos Asociados. 2010. La guía MetAS: Medición de Turbidez en la Calidad del Agua. Recuperado de febrero 2022 de <http://www.metas.com.mx/guiamet/la-Guia-MetAs-10-01-Turbidez.pdf>

Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). 2020. Informe técnico de cumplimiento de normas de calidad del agua. Norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas del Lago Llanquihue. Recuperado enero 2022 de <https://snifa.sma.gob.cl/>

Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). 2021. Informe técnico de cumplimiento de normas de calidad del agua. Norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas del Lago Llanquihue. Recuperado enero 2022 de <https://snifa.sma.gob.cl/>